

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

EXPLORATION D'UNE MÉTHODE D'ÉVALUATION DE LA
VULNÉRABILITÉ DES SYSTÈMES ESSENTIELS D'UNE RÉGION FACE
AUX EXTRÊMES MÉTÉOROLOGIQUES DANS UN CONTEXTE DE
CHANGEMENTS CLIMATIQUES

FABRICE OLIVRY

DÉPARTEMENT DE MATHÉMATIQUES ET DE GÉNIE INDUSTRIEL

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

MÉMOIRE PRÉSENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION
DU DIPLÔME DE MAÎTRISE ÈS SCIENCES APPLIQUÉES
(GÉNIE INDUSTRIEL)

AOÛT 2012

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

Ce mémoire intitulé :

EXPLORATION D'UNE MÉTHODE D'ÉVALUATION DE LA VULNÉRABILITÉ DES
SYSTÈMES ESSENTIELS D'UNE RÉGION FACE AUX EXTRÊMES
MÉTÉOROLOGIQUES DANS UN CONTEXTE DE CHANGEMENTS CLIMATIQUES

présenté par : OLIVRY Fabrice

en vue de l'obtention du diplôme de : Maîtrise ès sciences appliquées

a été dûment accepté par le jury d'examen constitué de :

M. BOURGAULT Mario, Ph.D, président

M. ROBERT Benoît, ing., Ph.D, membre et directeur de recherche

M. BOURQUE Alain, M. Sc., membre externe

DÉDICACE

*À mon grand-père, disparu alors que débutaient mes études à Montréal,
je dédie cette conclusion de ma formidable aventure canadienne.*

REMERCIEMENTS

En premier lieu je tiens à remercier mon directeur de recherche et professeur à l'École Polytechnique de Montréal, Monsieur Benoît ROBERT, pour m'avoir permis de collaborer avec lui et d'intégrer le *Centre risque & performance*. Ses enseignements, ses conseils, son écoute et sa compréhension tout au long de mes travaux auront été une des clés de leur aboutissement.

Mes pensées vont ensuite à mes amis des Arts qui ont assisté à mon départ pour la Belle Province et qui ont suivi à distance mes tribulations montréalaises : merci donc à JC, Thibaut, Delphine, Axel, Mickaël, Alicia, Guilhem et tous les autres qui se reconnaîtront. Je tiens à remercier tout particulièrement Laura qui a toujours su trouver les mots justes pour me remettre d'aplomb et me prêter une oreille attentive tout au long de mon séjour, et ce déjà bien avant mon départ. Sans toi je n'aurais jamais pu arriver aussi loin dans cette aventure.

Je pense également à mes amis de Montréal, à ceux qui sont rentrés en Europe : Alice, Vincent, Virginie, Mara, Neus, Alex, Myriam et les autres, mais aussi à ceux qui sont toujours là pour m'accompagner : Fred, Ikram, Marie, Philippe et Damien : merci pour tout le temps passé ensemble, pour votre soutien et vos encouragements.

Je pense énormément à toute ma famille et notamment à mes parents et mon frère pour avoir toujours cru en moi et m'avoir supporté tout au long de ces années à Montréal, malgré la distance, le décalage horaire et les moments parfois difficiles. Ce mémoire, ce départ c'est avant tout à vous que je le dois, merci d'y avoir cru avec moi.

Enfin, que serait toute cette épopée sans la plus belle rencontre de ma vie, mon amour Pauline, mon plus grand soutien qui m'accompagne au quotidien et sans qui je n'aurais pas pu mener à bien toute cette aventure. Merci du fond du cœur pour ta patience, ta générosité et le bonheur que tu m'apportes chaque jour qui passe depuis notre rencontre. La conclusion heureuse de toute cette histoire c'est à toi que je la dois.

RÉSUMÉ

Depuis la fin du XX^e siècle, les conséquences des changements climatiques ont de plus en plus d'impact sur nos sociétés modernes, ainsi que sur les systèmes essentiels – transport, électricité, télécommunications, eau potable – présents sur leurs territoires. Montée du niveau des océans, réchauffement global des températures et multiplication des phénomènes climatiques extrêmes sont autant d'exemples de menaces qui pèsent sur les communautés humaines et qui font de l'étude de leur vulnérabilité un enjeu majeur du XXI^e siècle.

L'objectif des travaux du présent mémoire est d'explorer, sur le principe des systèmes experts, une méthodologie d'évaluation de la vulnérabilité capable de faire appel à la fois aux connaissances des experts en changements climatiques et à celles des spécialistes en systèmes essentiels. Cette méthodologie permet d'intégrer et combiner plusieurs caractéristiques relatives aux équipements et infrastructures de ces systèmes, à la géographie de la région à l'étude mais aussi aux aléas climatiques à court et long terme présents sur le territoire.

Cette évaluation de la vulnérabilité s'appuie sur une notion de sensibilité qui consiste en une caractérisation du degré d'exposition de l'équipement à différents facteurs climatiques, en fonction de paramètres aggravants reliés à la géographie de la région. Une notion de criticité des équipements des systèmes experts est aussi considérée. Elle est évaluée selon l'importance de l'équipement au sein du réseau mais aussi sur d'autres paramètres propres à son implantation sur le territoire. Enfin, une cartographie du profil de vulnérabilité de la région aux différents facteurs climatiques est réalisée à partir de ces évaluations.

La méthodologie a ainsi été appliquée sur un territoire fictif afin de dresser des exemples des profils de vulnérabilité aux impacts des changements climatiques à l'échelle d'une région, donnant ainsi aux décideurs un moyen pour identifier les éventuels points faibles afin de prioriser les actions à entreprendre, notamment par l'intermédiaire des cartes de vulnérabilité.

Des exemples d'analyses spécifiques pour aider les décideurs à prévoir les effets directs de mesures d'adaptation (comme la mise en place de plans d'entretiens), ou encore à anticiper l'évolution de la vulnérabilité avec le vieillissement de l'équipement ou des modifications dans le temps de conditions climatiques, sont également montrés.

ABSTRACT

Since the end of the 20th century, the consequences of climate changes have been having more and more impact on today's societies and on the critical systems – transportation, electrical power, telecommunications, drinking water – that belongs to their area. The rise of the level of the oceans, the global warming and the increase of the number of extreme climatic events can be seen as examples of threats jeopardizing human communities and making the evaluation of their vulnerability one of the biggest stakes of this 21st century.

The main goal of this thesis is to explore an expert system-based method for the evaluation of vulnerability which should be able to combine the knowledge of both experts on climate changes and on critical systems. This methodology can integrate and combine several characteristics of the facilities and the infrastructures belonging to these systems, of the regional geography, and also of the various unknown local climatic conditions which can be short or long-term.

This assessment of vulnerability is based on a notion of sensibility, which consists in a characterization of the way a facility can be exposed to several climatic factors. This degree of exposition depends on aggravating parameters linked to the geography of the area. Then, a notion of the criticality of the critical systems facilities is also taken into account. It can be assessed according to the importance of the facility within its network and to other parameters peculiar to its setting up in the area. Finally a mapping of the vulnerability profile to the several climatic factors of the area can be carried out from these assessments.

The methodology has been applied on a fictitious area in order to generate examples of vulnerability profiles to region-scaled impacts of climate changes, thus giving the decision-makers a way to identify potential weak points and to prioritize the actions to undertake, particularly through the vulnerability maps.

Other examples of specific analyses helping decision-makers to foresee the direct effects of adaptation measures (as the setting-up of maintenance plans), or to anticipate the evolution of vulnerability along with the ageing of the facility and the alterations of the climate conditions over time will be showed.

TABLE DES MATIÈRES

DÉDICACE.....	III
REMERCIEMENTS	IV
RÉSUMÉ.....	V
ABSTRACT	VI
TABLE DES MATIÈRES	VII
LISTE DES TABLEAUX.....	X
LISTE DES FIGURES.....	XI
LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS	XIII
LISTE DES ANNEXES.....	XIV
INTRODUCTION.....	1
CHAPITRE 1 ÉTAT DES CONNAISSANCES.....	3
1.1 Contexte et positionnement de la recherche.....	3
1.2 Généralités sur les changements climatiques	5
1.2.1 Définitions.....	5
1.2.2 Mesures et prévisions	7
1.2.3 Conséquences des changements climatiques	10
1.2.4 Adaptation aux changements climatiques	11
1.3 Les systèmes essentiels	13
1.3.1 Définitions	13
1.3.2 Interdépendances et effets domino	14
1.4 Notions de sensibilité, criticité et vulnérabilité	19
1.4.1 Sensibilité	19

1.4.2	Criticité.....	20
1.4.3	Vulnérabilité.....	21
1.5	Les systèmes experts	23
1.5.1	Notions de base	23
1.5.2	Exemples d'applications	25
CHAPITRE 2 DÉVELOPPEMENT DE LA MÉTHODE		28
2.1	Description de la méthodologie.....	28
2.2	Choix des paramètres	29
2.2.1	Caractéristiques communes des changements climatiques	29
2.2.2	Caractéristiques des systèmes essentiels	37
2.2.3	Caractéristiques des municipalités et des régions	47
2.3	Élaboration de la base de faits	48
2.4	Élaboration de la base de règles	51
2.4.1	Règles relatives à la sensibilité de base.....	51
2.4.2	Règles relatives aux aggravateurs de sensibilité	53
2.4.3	Règles pour l'évaluation de la criticité.....	54
2.5	Combinaison des bases et application du raisonnement	56
CHAPITRE 3 ANALYSE DES RÉSULTATS		58
3.1	Simulation et premiers résultats pour une MRC-type.....	58
3.1.1	Éléments de simulation	58
3.1.2	Paramètres de la simulation.....	60
3.1.3	Premiers résultats	65
3.2	Profils de vulnérabilité	69
3.2.1	Notions de seuils de vulnérabilité	69

3.2.2	Influence des seuils de vulnérabilité pour le FC « Niveau d'eau »	70
CHAPITRE 4 APPLICATIONS SPÉCIFIQUES ET PERSPECTIVES		79
4.1	Vulnérabilité et mesures correctives	79
4.1.1	Contexte et paramètres	79
4.1.2	Choix des mesures correctives	81
4.1.3	Nouvelle analyse de vulnérabilité	82
4.2	Vulnérabilité, vieillissement et conditions de fonctionnement	83
4.2.1	Contexte et paramètres	83
4.2.2	Choix des changements de conditions	85
4.2.3	Nouvelle analyse de vulnérabilité	86
4.3	Perspectives et améliorations possibles.....	87
4.4	Limites de la méthodologie	90
CONCLUSION		92
LISTE DE RÉFÉRENCES.....		94
ANNEXES		97

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1-1 : Exemples de mesures climatiques directes	7
Tableau 1-2 : Exemples de mesures climatiques indirectes	8
Tableau 1-3 : Exemples de systèmes experts par secteurs	26
Tableau 2-1: Conséquences de l'évènement "Inondation" (adapté de Associated Program on Flood Management, 2006; Centre Européen de Prévention du Risque d'Inondation, 2010; Hausmann, 1999; Vigneron, 2005)	31
Tableau 2-2 : Conséquences de l'évènement "Vents violents / Tornades" (adapté de Direction de la santé environnementale et de la toxicologie, 2010; Dubrion, 2008; Riser, 2010)	32
Tableau 2-3: Correspondances facteurs climatiques / évènements climatiques	35
Tableau 2-4 : Exemple de table du potentiel d'impact du FC "Température" sur un équipement .	41
Tableau 2-5 : Échelle d'évaluation du paramètre "État de l'équipement"	46
Tableau 2-6 : Échelle d'évaluation du paramètre "Entretien"	47
Tableau 2-7 : Base de faits	50
Tableau 2-8 : Règles pour la sensibilité de base	52
Tableau 2-9 : Règles pour les aggravateurs de sensibilité	54
Tableau 2-10 : Règles relatives à la criticité	55
Tableau 3-1 : Identification et classification des équipements	61
Tableau 3-2 : Exemple de paramètres pour un équipement fictif	62
Tableau 4-1 : Paramètres caractéristiques pour l'équipement T2.....	80
Tableau 4-2 : Paramètres pour l'équipement T2 après application des mesures	81
Tableau 4-3 : Paramètres caractéristiques pour l'équipement H1	84
Tableau 4-4 : Paramètres pour l'équipement H1 après application des changements.....	85
Tableau 4-5 : Exemple de la nouvelle base de faits	89

LISTE DES FIGURES

Figure 1-1 : Positionnement de la recherche	4
Figure 1-2 : Différence entre variabilité et changement climatique (adapté de Burroughs, 2007) ..	6
Figure 1-3: Exemple de courbes d'effet domino (tiré de Robert, Morabito & Cloutier, 2012).....	16
Figure 1-4: Simulation sur DOMINO (tiré de Robert, Morabito & Cloutier, 2012)	18
Figure 1-5 : Concept de base d'un système expert (adapté de Giarratano, 1998).....	24
Figure 2-1: Représentation théorique d'un système (tiré de Robert et al., 2009).....	38
Figure 2-2: Schématisation de la méthodologie	56
Figure 3-1: Modélisation de la MRC-type	59
Figure 3-2 : Implantation des équipements sur le territoire de la MRC-type	64
Figure 3-3 : Vulnérabilité des équipements électriques aux différents FC	65
Figure 3-4 : Vulnérabilité des équipements de gaz aux différents FC	66
Figure 3-5 : Vulnérabilité des équipements hydrauliques aux différents FC.....	67
Figure 3-6 : Vulnérabilité des équipements télécoms aux différents FC	68
Figure 3-7 : Vulnérabilité des équipements de la MRC au facteur climatique "Niveau d'eau"	70
Figure 3-8 : Équipements vulnérables pour une politique dure (SV-NE = 10).....	72
Figure 3-9 : Cartographie de la vulnérabilité de la MRC pour une politique de gestion dure	73
Figure 3-10 : Équipements vulnérables pour une politique modérée (SV-NE = 13).....	74
Figure 3-11 : Cartographie de la vulnérabilité de la MRC pour une politique de gestion modérée	75
Figure 3-12 : Équipements vulnérables pour une politique modérée (SV-NE = 15).....	76
Figure 3-13 : Cartographie de la vulnérabilité de la MRC pour une politique de gestion souple..	77
Figure 4-1: Vulnérabilité de l'équipement T2 selon les différents FC	80

Figure 4-2 : Comparatif des vulnérabilités pour l'équipement T2	82
Figure 4-3 : Vulnérabilité de l'équipement H1 selon les différents FC.....	84
Figure 4-4 : Comparatif des vulnérabilités pour l'équipement H1	86

LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS

CC	Changement(s) climatique(s)
CCI	Conseil canadien des ingénieurs
CRP	Centre risque & performance
DDVM	Durée de vie moyenne
EC	Évènement climatique
FC	Facteur climatique
MRC	Municipalité régionale de comté
MSPQ	Ministère de la Sécurité publique du Québec
MP	Matières premières
SE	Système(s) essentiel(s)
SV	Seuil de vulnérabilité

LISTE DES ANNEXES

ANNEXE 1 – CONSÉQUENCES DES ÉVÈNEMENTS CLIMATIQUES.....	97
ANNEXE 2 – POTENTIELS D’IMPACT DES FACTEURS CLIMATIQUES	99
ANNEXE 3 – DESCRIPTION DES PARAMÈTRES	100
ANNEXE 4 – TYPES D’ACTIONNEURS.....	104
ANNEXE 5 – BASE DE RÈGLES.....	105
ANNEXE 6 – ANALYSE : ÉQUIPEMENT E1.....	114
ANNEXE 7 – ANALYSE : ÉQUIPEMENT E2.....	115
ANNEXE 8 – ANALYSE : ÉQUIPEMENT E3.....	116
ANNEXE 9 – ANALYSE : ÉQUIPEMENT E4.....	117
ANNEXE 10 – ANALYSE : ÉQUIPEMENT E5.....	118
ANNEXE 11 – ANALYSE : ÉQUIPEMENT E6.....	119
ANNEXE 12 – ANALYSE : ÉQUIPEMENT G1	120
ANNEXE 13 – ANALYSE : ÉQUIPEMENT G2	121
ANNEXE 14 – ANALYSE : ÉQUIPEMENT G3	122
ANNEXE 15 – ANALYSE : ÉQUIPEMENT G4	123
ANNEXE 16 – ANALYSE : ÉQUIPEMENT G5	124
ANNEXE 17 – ANALYSE : ÉQUIPEMENT T1.....	125
ANNEXE 18 – ANALYSE : ÉQUIPEMENT T2.....	126
ANNEXE 19 – ANALYSE : ÉQUIPEMENT T3.....	127
ANNEXE 20 – ANALYSE : ÉQUIPEMENT T4.....	128
ANNEXE 21 – ANALYSE : ÉQUIPEMENT H1	129
ANNEXE 22 – ANALYSE : ÉQUIPEMENT H2	130

INTRODUCTION

La fin du XX^e siècle et le début du siècle actuel ont été marqués par un grand nombre d'évènements climatiques extrêmes : la crise du verglas au Québec en 1998, la tempête de décembre 1999 en Europe, l'ouragan Katrina au États-Unis en 2005 en sont quelques exemples. La multiplication de ces phénomènes est une des conséquences observées des changements que subit le climat actuel. Face à ces évènements et à l'ampleur de leurs impacts sur nos sociétés modernes, nombreux sont les acteurs qui s'interrogent sur le degré de préparation des communautés humaines et sur leur vulnérabilité à ces conséquences des changements climatiques.

La vulnérabilité est une notion complexe, multidisciplinaire, aussi son évaluation est bien souvent conditionnée par le domaine de compétence auquel sont affiliés les experts en charge de la caractériser. Les changements climatiques se révèlent également être de la même nature plurielle, de par la très grande diversité des impacts qu'ils peuvent avoir, que ce soit sur les communautés humaines ou sur l'environnement dans lequel elles sont implantées. Outre les bilans humains très importants des phénomènes extrêmes, les infrastructures essentielles qui supportent ces communautés peuvent être à même d'être directement touchées par ces impacts, en particulier par ceux des phénomènes météorologiques extrêmes découlant des changements climatiques.

Dans un tel contexte, l'objectif des présents travaux est d'explorer une méthodologie d'évaluation de la vulnérabilité des régions et des municipalités face à ces extrêmes météorologiques, en combinant à la fois la vision propre à un expert en changements climatiques et celle propre à un expert en systèmes essentiels, tout en tenant compte des spécificités géographiques de la région ou de la municipalité étudiée. Une telle méthodologie s'inscrit dans une démarche de développement d'un outil décisionnel permettant aux décideurs de ces régions de prendre les dispositions qui s'imposent pour réduire la vulnérabilité de leurs communautés.

Le premier chapitre de ce mémoire présente une revue des différents concepts utilisés tout au long des travaux de recherche, ainsi qu'un positionnement de la démarche effectuée lors de l'élaboration du présent mémoire. Une partie sera par ailleurs consacrée aux systèmes experts, dont va s'inspirer la méthodologie présentée.

Le deuxième chapitre traite de l'élaboration de la méthode, ainsi que du choix des paramètres qui interviennent dans l'évaluation finale de la vulnérabilité. Il sera également précisé la façon dont les concepts décrits dans le chapitre précédent seront évalués.

Dans le troisième chapitre, des analyses seront menées sur un environnement fictif afin d'éprouver les limites de la méthodologie et de donner de premiers exemples des résultats qu'il est possible d'obtenir pour une municipalité.

Enfin, le quatrième chapitre présente des analyses spécifiques permettant de mettre l'accent sur d'autres moyens d'utiliser la méthode et sur la façon dont il est possible de la faire évoluer en un véritable outil décisionnel permettant de dresser et d'exploiter des profils de vulnérabilité aux changements climatiques bien plus précis. Les limites de la méthodologie proposée dans ce mémoire seront également discutées.

CHAPITRE 1 ÉTAT DES CONNAISSANCES

1.1 Contexte et positionnement de la recherche

Les sociétés modernes sont aujourd'hui de plus en plus confrontées aux conséquences des changements climatiques : augmentation des températures, multiplication des phénomènes extrêmes, fonte des glaciers et montée du niveau des océans pour n'en citer que quelques exemples (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat [GIEC], 2007c; Le Petit Robert, 2012). Ces conséquences peuvent avoir à moyen ou à long terme des impacts négatifs sur les populations des régions touchées. Bien souvent les réseaux et les systèmes dits « essentiels » de nos sociétés sont directement touchés et deviennent sujets à des défaillances.

Ces défaillances peuvent alors alourdir le bilan des conséquences directes des changements climatiques sur les populations, notamment en raison de liens existants entre les différents systèmes qui les rendent dépendants les uns des autres et entraînent ainsi des défaillances en chaîne. La question de la vulnérabilité de nos sociétés face aux conséquences des changements climatiques se pose donc aujourd'hui plus que jamais, tout autant que la question de leur adaptation à ces changements (Ouranos, 2010a).

C'est dans ce cadre que s'inscrivent les travaux qui seront présentés tout au long de ce mémoire, travaux qui proposeront l'élaboration d'une méthodologie d'évaluation de la vulnérabilité de certains systèmes essentiels (SE). Cette méthodologie s'appuiera principalement sur une compréhension globale des changements climatiques et de leurs impacts sur nos sociétés qui sera complétée par un aperçu des SE et de la façon dont il est possible de caractériser leur vulnérabilité. Par ailleurs, l'étude portera sur les systèmes essentiels à l'échelle d'une Municipalité régionale de comté (MRC).

La méthodologie présentée ici a pour vocation de poser les premières bases théoriques d'une évaluation de la vulnérabilité des SE, et de permettre ainsi que s'organisent des collaborations futures entre experts des changements climatiques (CC) et experts des systèmes essentiels (SE), comme le schématise la figure 1-1.

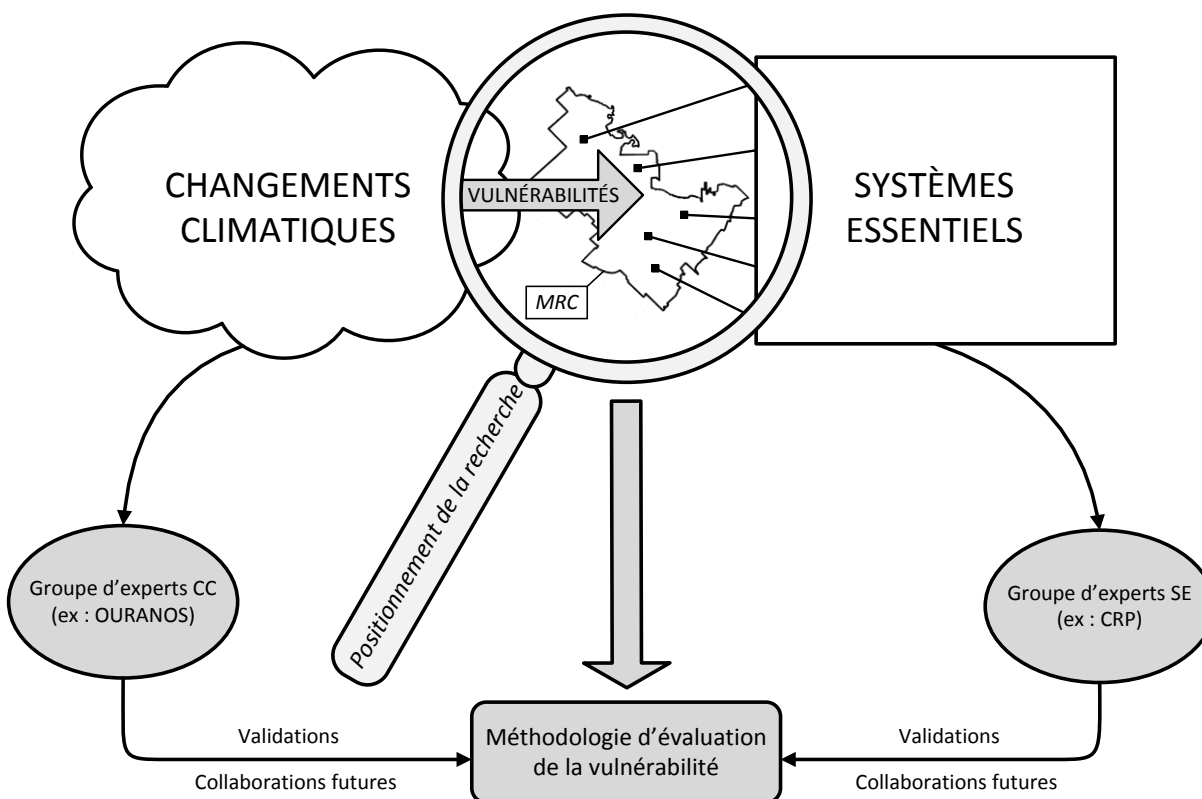


Figure 1-1 : Positionnement de la recherche

Par le biais de ces collaborations, il sera possible d'enrichir la méthodologie par des considérations quantitatives (niveaux des échelles, valeurs de seuils, etc...) et des validations des paramètres, ce qui pourra mener à la conception d'un outil d'analyse complet. Ces considérations ne seront pas abordées dans le présent mémoire, encore une fois il ne sera question ici que de combiner les concepts de base en changements climatiques (CC) et en systèmes essentiels (SE) pour en tirer une évaluation de la vulnérabilité.

En effet, les problématiques liées aux changements climatiques couvrent un grand nombre de domaines d'expertise, et il est aisé de comprendre qu'une multitude de points de vue pourraient être adoptés pour cette seule question de l'évaluation de la vulnérabilité des systèmes essentiels. Il serait ainsi possible d'adopter successivement le point de vue d'un économiste, d'un expert en CC, d'un expert en sécurité civile, d'un expert en SE, etc... et ainsi d'avoir tout un panel de visions très diverses du même problème.

Comme le rappelle la figure 1-1, le point de vue qui sera adopté dans ces travaux sera un point de vue plutôt médian, à mi-chemin entre le monde des experts en CC et celui des experts en SE. Une vision plus globale et complète sera ainsi privilégiée comme ligne directrice de l'élaboration de cette méthodologie, afin de pouvoir avoir une bonne compréhension des mécanismes, des concepts généraux au cœur de la problématique abordée.

1.2 Généralités sur les changements climatiques

1.2.1 Définitions

1.2.1.1 Le climat

Le « climat » renvoie à une observation statistique du temps qu'il fait, à la différence que le temps peut être considéré comme étant l'état présent et « le climat » comme le temps auquel il est possible de s'attendre d'après des observations effectuées sur une certaine période (Burroughs, 2007). Le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) précise d'ailleurs qu'une période-type est fixée par l'Organisation Météorologique Mondiale à environ 30 ans (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat [GIEC], 2007a).

1.2.1.2 Changement et variabilité climatique

La notion de « changements climatiques » se décline en premier lieu au singulier : on parle en effet de manière plus générale du « changement climatique », les « changements climatiques » caractérisant souvent ses conséquences ou encore les observations qui en sont faites.

Selon le GIEC, le changement climatique se caractérise comme étant une modification des grandeurs statistiques décrivant le climat, modification pouvant être dues soit à sa « variabilité naturelle », soit à des causes anthropiques. Parmi ces grandeurs figurent notamment la température, les hauteurs de précipitations et les vents. La variabilité au sens climatique est ici définie comme étant la variation sur une période d'observation donnée des valeurs moyennes, des écarts-types ou encore de la fréquence des phénomènes extrêmes (GIEC, 2007a).

Burroughs (2007) précise à ce sujet que la différence entre variabilité et changement climatique est avant tout une affaire de tendance : si les données climatiques peuvent connaître certaines variations autour d'un état moyen (variabilité naturelle), il est avéré qu'il y a changement climatique lorsque cette tendance vient elle-même à connaître des variations. La figure 1-2 donne un exemple de la différence pour une variable climatique hypothétique sur une période de temps T quelconque :

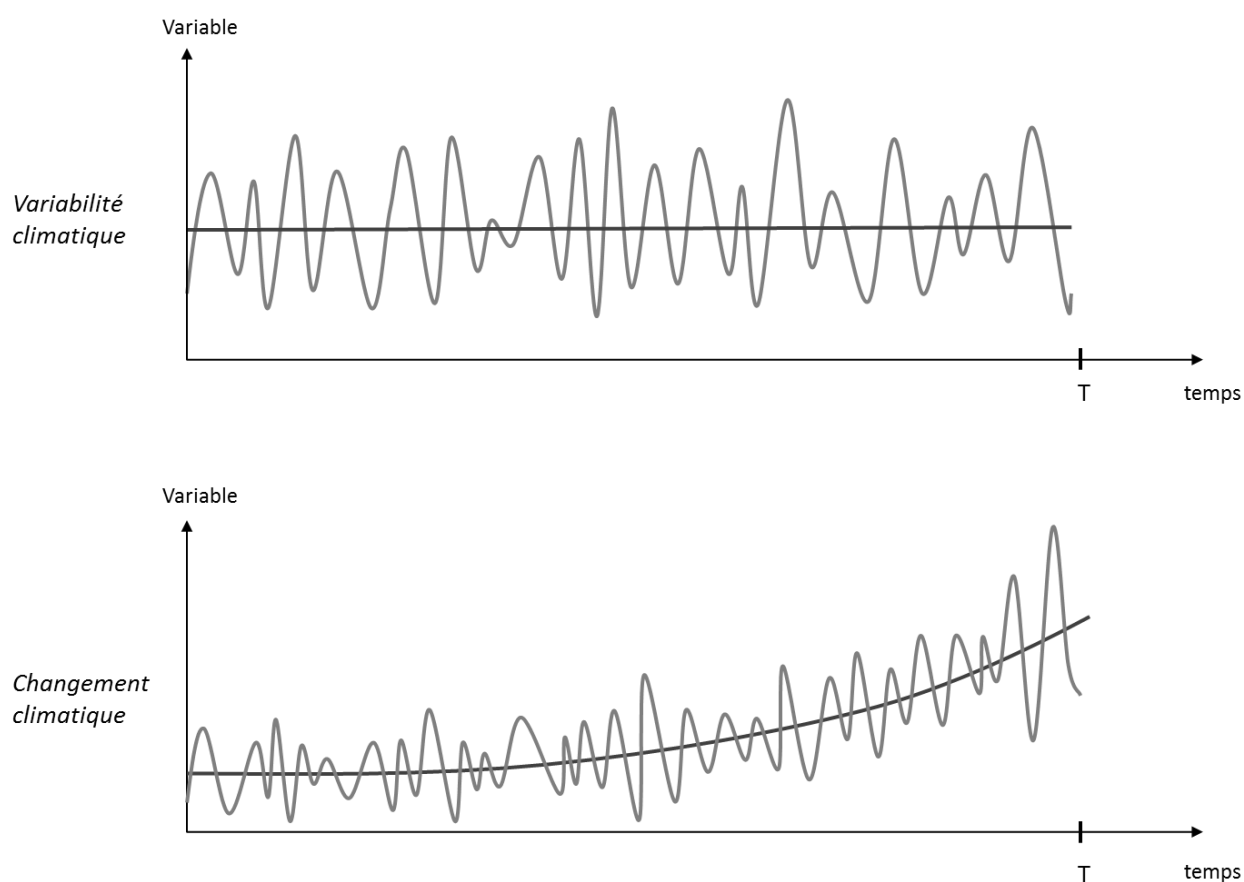


Figure 1-2 : Différence entre variabilité et changement climatique (adapté de Burroughs, 2007)

D'une manière générale il est possible de considérer que toute variation au cours d'une période d'observation donnée de la tendance de la valeur moyenne, de l'écart-type ou de la fréquence des amplitudes extrêmes des grandeurs climatiques constitue un changement climatique.

Les « changements climatiques » sont ainsi toutes les observations et prévisions faites de telles variations, et ce quelle que soit leur origine. Il est à noter qu'à ce sujet la Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques (CCUNCC) fait la distinction entre les changements climatiques, « attribués directement ou indirectement à une activité humaine altérant la composition de l'atmosphère mondiale » et la variabilité naturelle du climat, considérant ainsi seulement la partie d'origine anthropique de ces changements (Organisation des Nations Unies [ONU], 1992).

1.2.2 Mesures et prévisions

1.2.2.1 Techniques de mesures

Il existe une grande diversité de procédés permettant de mesurer l'ampleur des changements climatiques, chacun étant adapté à une ou plusieurs grandeurs caractéristiques du climat. Ces techniques peuvent être des mesures directes de ces paramètres ou encore des mesures d'autres phénomènes régis par l'influence combinée de plusieurs grandeurs climatiques. Les tableaux ci-dessous dressent une liste de quelques techniques employées de nos jours pour l'évaluation du climat ainsi que les grandeurs associées (adapté de Burroughs, 2007) :

Tableau 1-1 : Exemples de mesures climatiques directes

<i>Technique de mesure</i>	Paramètres associés
<i>Mesures de température au sol</i>	Température surface terrestre
<i>Mesures de températures en mer</i>	Température surface de l'eau
<i>Mesures de précipitations</i>	Volume précipitations Fréquence précipitations
<i>Radiométries satellites</i>	Température sol / mer Étendue couverture neigeuse Étendue des glaces

Tableau 1-2 : Exemples de mesures climatiques indirectes

<i>Technique de mesure</i>	Paramètres associés
<i>Cernes des arbres</i>	Température surface terrestre Volume précipitations Fréquence précipitations Taux d'humidité
<i>Carottes glacières</i>	Volume chutes de neiges
<i>Spéléothèmes</i>	Volume précipitations Fréquence précipitations Température surface terrestre
<i>Sédiments des océans</i>	Température océans Étendue des glaces
<i>Coraux</i>	Niveau d'ensoleillement Température océans

Ces exemples de techniques montrent que la mesure du climat ne se limite pas à la simple appréhension du climat actuel, mais passe aussi par la compréhension du climat passé. Les mesures indirectes présentées plus haut (Tableau 1-2) montrent ainsi comment il est possible en analysant certains éléments présents aujourd'hui dans notre environnement d'avoir accès à de précieux renseignements sur les grandeurs climatiques à des ères antérieures.

Les données recueillies se doivent bien souvent d'être corrigées et ajustées afin d'éliminer tout biais induit par les conditions-mêmes de mesure. Par exemple les données de températures collectées en zones urbaines sont modifiées pour prendre en compte l'effet des îlots de chaleur urbains (Metz, 2010).

1.2.2.2 Méthodes de prévision du climat

Pour l'évaluation des changements climatiques, outre la connaissance du climat actuel et passé, il est important d'en déduire une projection du climat à venir. C'est de cette manière qu'il sera possible de confirmer ou d'infirmer les tendances observées actuellement.

La caractérisation du climat fait appel à de nombreux paramètres physiques, biologiques ou encore anthropiques tous dépendants les uns des autres, et les relations qui les lient sont souvent complexes. De plus, il faut considérer que ces caractérisations sont dépendantes de celles observées à des périodes antérieures, ajoutant ainsi des interactions temporelles (Pew Center on Global Climate Change, 2001). Pour tenter de répondre à ces problématiques de la manière la plus pratique possible, les meilleurs outils qui ont été développés sont les modèles mathématiques. Leur principale fonction consiste en l'élaboration de différents scénarios climatiques à partir d'un ensemble de paramètres et de données ajustables par les utilisateurs. Il en existe tout un panel, parmi lesquels se détachent deux grands types de modèles dont l'emploi dépend de la complexité des projections à établir (Pew Center on Global Climate Change, 2001):

- *Les modèles simples* qui permettent des projections à grande échelle pour de grandes variables climatiques et qui ont l'avantage d'être rapides d'exécution, d'être plus facilement adaptables aux besoins de l'utilisateur et de fournir des résultats qui excluent la part de variabilité naturelle du climat;
- *Les modèles de circulation générale* qui sont parfaitement adaptés à des projections mettant en jeu un très grand nombre de variables climatiques sur une zone très localisée et qui donnent des résultats exhaustifs sur le comportement de l'atmosphère et des océans.

Les scénarios climatiques issus de ces modèles sont autant de grandes tendances donnant les évolutions potentielles du climat et les différences entre ces scénarios et le climat actuel constituent les scénarios de changements climatiques (GIEC, 2007a). La fiabilité de tels résultats peut parfois varier d'une variable climatique considérée à une autre.

Ainsi il est plus possible de se fier aux estimations relatives aux températures qu'à celles relatives aux précipitations (GIEC, 2007b). Par ailleurs, la fiabilité des modèles donnant un aperçu global du climat a tendance à souffrir du passage à de plus petites échelles d'étude, notamment car les limitations des ordinateurs actuels et des connaissances scientifiques rendent difficile l'intégration de caractéristiques extrêmement locales dans des simulation à échelle globale. L'un des meilleurs exemples à ce sujet est la formation des nuages, en particulier la manière dont elle peut réagir aux changements climatiques (GIEC, 2007b)

1.2.3 Conséquences des changements climatiques

Bien qu'il existe de nombreuses positions concernant l'origine et l'étendue des impacts des changements climatiques, il est néanmoins avéré que le climat connaît actuellement de profondes modifications observables et quantifiables depuis plusieurs décennies (Metz, 2010). Parmi les changements constatés figurent principalement (GIEC, 2007c) :

- une hausse des températures moyennes de l'atmosphère et des océans;
- une augmentation du niveau des océans;
- une fonte massive des neiges et des glaces;
- une augmentation de la fréquence des phénomènes extrêmes;
- une altération des régimes de précipitations.

Ces changements climatiques se font sentir aujourd'hui dans toutes les régions du globe, et ont de graves conséquences à moyen et long terme sur les populations, l'environnement naturel et plus généralement nos sociétés. En voici quelques exemples :

- Au Québec, la hausse prévue des températures moyennes coïncide avec une augmentation du nombre d'épisodes de sécheresses et de canicules au cours des saisons chaudes, entraînant un stress hydrique important tout en posant d'importantes problématiques de santé publique. Une fonte du pergélisol dans les régions nordiques est également observée, due au redoux hivernal et à l'augmentation de précipitations hivernales (Ouranos, 2010a);

- Par ailleurs, les perturbations des régimes de précipitations sont à même d'entraîner des inondations plus fréquentes et plus importantes dans le Sud du Québec, menaçant ainsi les infrastructures en place en bordure de cours et de points d'eau ainsi que la santé publique dans ces régions. Des épisodes orageux plus fréquents sont également à prévoir (Ouranos, 2010b);
- Dans les zones côtières québécoises, les conséquences des changements climatiques sont avant tout dues à une augmentation significative du niveau de la mer et de la multiplication des phénomènes de tempêtes. La conjugaison de ces deux phénomènes contribue à l'érosion côtière dans ces régions et ainsi à la dégradation des infrastructures et habitations qui y sont implantées (Ouranos, 2010b).

Le Québec ne représente ici qu'un échantillon de la diversité des changements climatiques qui surviennent et vont survenir à travers le monde. Dans chaque cas les infrastructures, les systèmes naturels et de manière plus générale les conditions de vie des populations voient leur état altéré sous l'action des impacts des changements climatiques. Une persistance voire une aggravation des tendances observées actuellement est également pressentie pour les décennies à venir (GIEC, 2007c).

1.2.4 Adaptation aux changements climatiques

Les modifications du climat à venir vont profondément affecter la manière de fonctionner de nos sociétés, et les problématiques liées aux moyens de s'adapter à ces changements sont désormais au cœur des enjeux majeurs des années à venir.

Le consortium Ouranos définit l'adaptation aux changements climatiques comme étant « un processus par lequel les communautés et les écosystèmes s'ajustent aux changements et effets associés, afin de limiter les conséquences négatives et de profiter des bénéfices potentiels » (Ouranos, 2010a).

De son côté, le GIEC définit plusieurs types d'adaptation différents (GIEC, 2007a) :

- *L'adaptation anticipative* qui consiste à agir avant que les effets des changements anticipés se fassent sentir;
- *L'adaptation autonome* qui consiste en une réponse spontanée mais non planifiée aux impacts climatique, et qui peut être issue des « changements écologiques dans les systèmes naturels ou d'une évolution des conditions du marché ou de l'état de bien-être dans les systèmes humains »;
- *L'adaptation planifiée* qui se base sur la définition d'une stratégie visant à mettre en place des mesures de réponse aux changements climatiques observés et subis.

Dans le cadre de l'adaptation planifiée aux changements climatiques, il appartient de définir dans la stratégie d'adaptation un ensemble de mesures visant à réguler les conséquences des impacts de ces changements, que ce soit en vue de les annuler ou encore de les réduire. Dans son Plan national d'adaptation au changement climatique, le Ministère de l'Écologie français définit plusieurs domaines d'actions pour classer ces mesures (Ministère de l'Écologie, 2011):

- production et diffusion d'informations;
- ajustement des normes et réglementations;
- adaptation des institutions;
- investissement direct.

Par exemple, dans l'étude de l'adaptation aux changements climatiques des infrastructures des communautés humaines, ces mesures peuvent prendre la forme de nouveaux choix de conceptions à adopter, de nouveaux matériaux à employer ou encore de nouvelles normes à intégrer (Auld, 2007). Ce sont des mesures qui relèvent ainsi à la fois d'un ajustement des normes et d'une adaptation des institutions. Plusieurs organismes comme Ouranos proposent également aux municipalités la mise en place de plans d'adaptation aux changements climatique afin de leur permettre d'élaborer leurs propres stratégies et de favoriser la mise en place de mesures spécifiques aux conséquences locales des modifications du climat (Ouranos, 2010a).

1.3 Les systèmes essentiels

1.3.1 Définitions

Le ministère de la Sécurité publique du Canada ([MSPC], 2012) se base sur une notion d'« infrastructures essentielles » qu'il définit comme étant « les processus, les systèmes, les installations, les technologies, les réseaux, les biens et les services qui sont essentiels à la santé, à la sécurité ou au bien-être économique des Canadiens et des Canadiennes, ainsi qu'au fonctionnement efficace du gouvernement. »

Pour sa part, le ministère de la Sécurité publique du Québec (MSPQ) parle d'« infrastructures stratégiques ». Les deux terminologies caractérisent le même concept, à ceci près que le Québec considère la notion de conséquences en insistant sur le fait qu'une infrastructure stratégique est « une infrastructure qui fournit un service d'une importance telle pour la société que sa perte engendrerait des conséquences majeures sur la santé, la sécurité ou le bien-être des citoyens ou encore sur le fonctionnement efficace du gouvernement. » (Ministère de la Sécurité publique du Québec, 2012).

En s'appuyant sur ces concepts, le MSPQ définit dans sa « Démarche gouvernementale de résilience des systèmes essentiels » la notion de « ressource essentielle » comme étant « des ressources dont l'indisponibilité, même momentanée, peut engendrer des conséquences potentielles significatives et néfastes sur la santé, la vie, la sécurité, le bien-être social et économique d'une personne ou d'une collectivité, sur la viabilité d'une entreprise et sur le fonctionnement efficace du gouvernement et de ses institutions ». Les « systèmes essentiels » sont ainsi les systèmes produisant ces ressources (Neault, Robert, & Dufour, 2009).

Il est également possible de regrouper les infrastructures essentielles d'un territoire en dix secteurs (Ministère de la Sécurité publique du Canada, 2012) :

- Santé;
- Alimentation;
- Finances;
- Eau;
- Technologies de l'information et de la communication;

- Sécurité;
- Énergie et services publics;
- Secteur manufacturier;
- Gouvernement;
- Transport.
-

C'est cette dernière catégorisation des systèmes essentiels (SE) qui sera retenue pour la suite des présents travaux et qui regroupera l'ensemble des infrastructures et des services d'un territoire donné visant à produire les ressources essentielles pour les institutions et populations de ce territoire.

Dans le cas d'une Municipalité régionale de comté (MRC), ces systèmes essentiels regroupent ainsi les infrastructures et services municipaux fournissant eau, électricité, gaz, télécommunications, eau potable, etc... De tels systèmes peuvent par exemple prendre la forme de stations d'eau potable, de lignes électriques, de postes de transformations, de gazoducs, de postes de distribution, d'antennes-relais ou encore de services de voirie. La liste n'est bien sûr pas exhaustive et une revue plus complète sera présentée par la suite dans ce mémoire.

1.3.2 Interdépendances et effets domino

Comme le spécifie le MSPC (2012) les systèmes et infrastructures essentiels « peuvent être autonomes ou interconnectées et interdépendantes dans les administrations provinciales, territoriales ou nationales ou entre celles-ci ».

Il existe ainsi entre les différents systèmes essentiels présents sur un territoire donné un certain nombre de relations spécifiques qui lient plusieurs voire la totalité de ces systèmes entre eux en un réseau relationnel complexe. D'après Rinaldi et al. (2001), ces « interdépendances » constituent une relation bidirectionnelle entre deux infrastructures par l'intermédiaire de laquelle l'état de l'une influence l'état de l'autre. Ainsi, de façon plus générale, deux systèmes sont interdépendants à partir du moment où l'un dépend de l'autre.

De plus, il est possible de distinguer différents types d'interdépendances, leur nature étant directement liée aux caractéristiques des systèmes interconnectés et interdépendants (Rinaldi et al., 2001).

- *Les interdépendances physiques* : chacun des systèmes est dépendant d'une ou plusieurs ressources matérielles fournies par l'autre;
- *Les interdépendances cybernétiques* : les deux systèmes sont dépendants des informations qu'ils s'échangent;
- *Les interdépendances géographiques* : les deux systèmes peuvent être affectés par une même perturbation localisée géographiquement;
- *Les interdépendances logiques* : les dépendances mutuelles entre les deux systèmes ne sont d'ordre ni physiques, ni cybernétiques, ni géographiques.

Les différentes catégories listées plus haut ne sont pas mutuellement exclusives, et il est possible que deux systèmes partagent plusieurs de ces types d'interdépendances simultanément. Il apparaît alors que lorsqu'une défaillance survient sur un système qui entretient une ou plusieurs interdépendances avec d'autres, celle-ci peut se propager et entraîner d'autres défaillances pour les autres systèmes interconnectés.

Ces derniers peuvent entretenir différentes relations de dépendances qui vont communiquer ces défaillances à d'autres systèmes et ainsi de suite... Ce jeu de défaillances et de propagations en cascade constitue un « effet domino ». Les travaux de Rieners et al. différencient deux grands types d'effets domino (Reniers, Dullaert, Ale, & Soudan, 2005) :

- *Les effets domino internes* qui consistent en la propagation d'une défaillance interne au système essentiel considéré, la propagation d'une panne d'un équipement à un autre par exemple;
- *Les effets domino externes* qui consistent en une propagation de la défaillance d'un système à ceux qui lui sont dépendants.

Il en résulte ainsi que d'un effet domino interne peut découler un effet domino externe, dans la mesure où la défaillance interne finit par causer la défaillance du système entier. De tels cas de figure peuvent ainsi engendrer des conséquences à très grande échelle à partir d'un unique événement très localisé. Pour analyser ces effets domino, le Centre risque & performance (CRP) de l'École Polytechnique de Montréal a développé une méthodologie et un outil permettant d'identifier et d'analyser les situations génératrices de ces effets : DOMINO (Robert, Morabito, & Cloutier, 2012).

L'outil met l'accent sur les effets domino externes et permet de générer des courbes permettant de visualiser les défaillances en cascade consécutives à la mise en défaut d'une ressource dans un secteur géographique donné. La figure suivante donne un exemple de ces courbes caractéristiques des effets domino dans le cas d'une coupure d'eau.

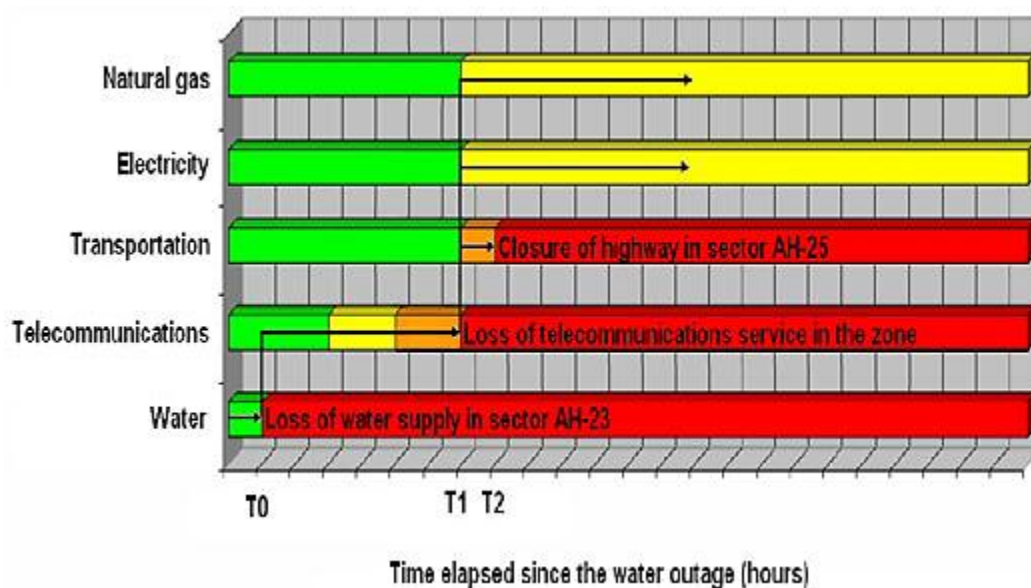


Figure 1-3: Exemple de courbes d'effet domino (tiré de Robert, Morabito & Cloutier, 2012)

Sur cette figure, il est ainsi possible de voir la propagation des défaillances d'un système à un autre : à T0 une coupure d'eau se produit, ce qui entraîne quelques heures plus tard à T1 une défaillance des télécommunications dans le secteur affecté.

Ces défaillances sont immédiatement suivie d'une autre défaillance du système « Transport » à T2 (fermeture de l'autoroute) et de perturbations diverses des systèmes « Électricité » et « Gaz naturel ». DOMINO fournit donc les informations sur l'évolution de la situation à l'échelle d'un secteur à partir de la simulation d'un évènement localisé. Il est également possible de suivre de manière visuelle les défaillances survenant dans les secteurs voisins du secteur touché initialement, défaillances qui se propagent à d'autres systèmes. La figure suivante (Figure 1-4) donne un exemple du genre de simulations pouvant être effectuées par DOMINO à l'échelle d'un ensemble de secteurs.

Il est par exemple possible de voir que la simulation démarre par une coupure d'eau dans un secteur donné, ce qui affecte très rapidement quinze systèmes, et provoque ensuite une interruption de la circulation sur une portion d'autoroute une heure plus tard. Par la suite les défaillances s'enchaînent et se multiplient, avec quarante systèmes perturbés à 11h37 et l'interruption des télécommunications dans une large zone. Enfin, sept heures après la panne initiale, DOMINO affiche une situation qui s'est encore aggravée avec de nouveaux systèmes perturbés et la coupure de nouveaux tronçons d'autoroutes autour du secteur de la défaillance de départ.

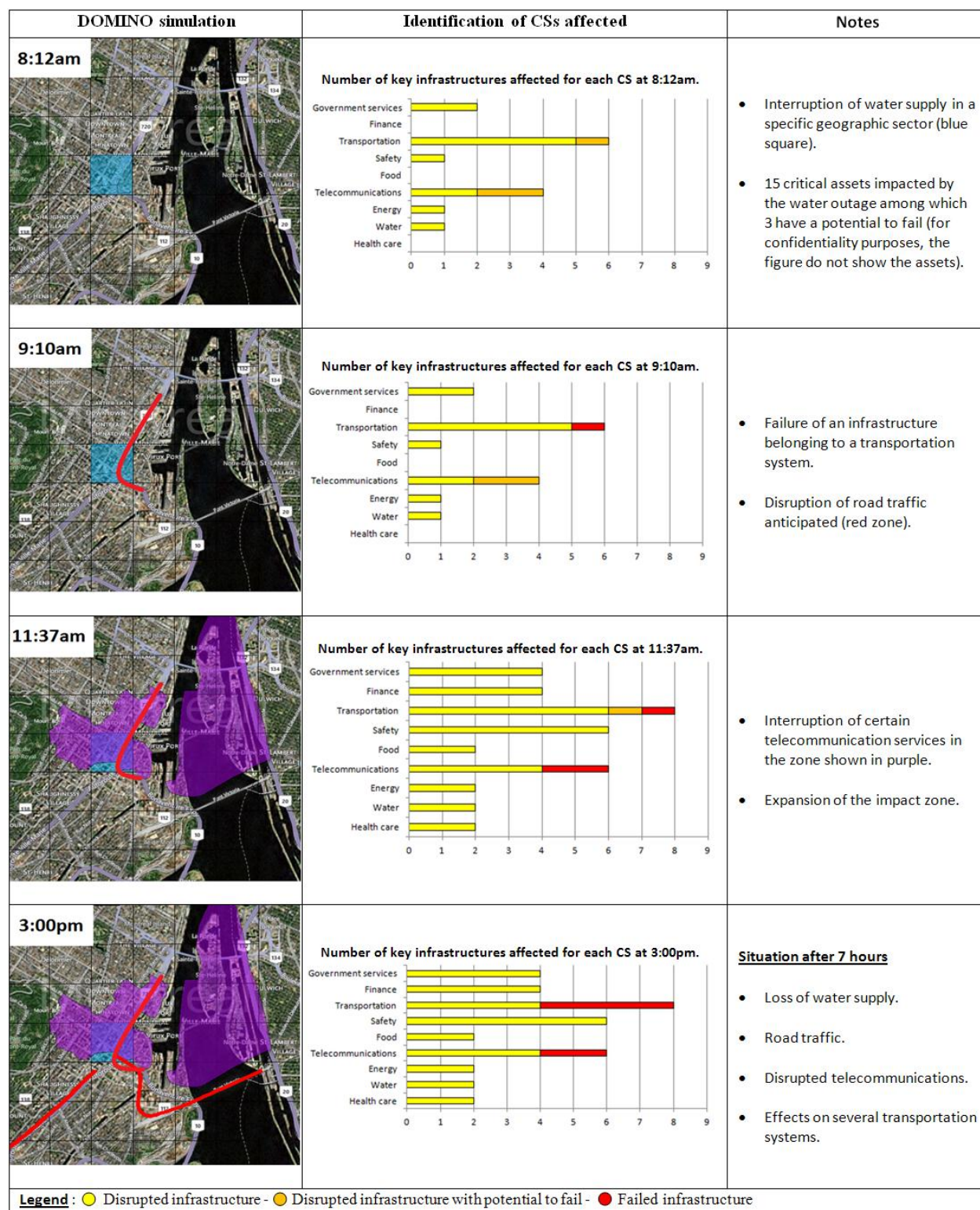


Figure 1-4: Simulation sur DOMINO (tiré de Robert, Morabito & Cloutier, 2012)

1.4 Notions de sensibilité, criticité et vulnérabilité

Il convient à présent de préciser un certain nombre de notions qui seront employées par la suite dans ce mémoire, afin qu'il ne subsiste aucune ambiguïté sur leur signification.

1.4.1 Sensibilité

Le MSPQ (2008) définit la sensibilité comme étant la « proportion dans laquelle un élément exposé, une collectivité ou une organisation est susceptible d'être affecté par la manifestation d'un aléa », l'aléa pouvant se traduire par un « phénomène, manifestation physique ou activité humaine susceptible d'occasionner des pertes en vies humaines ou des blessures, des dommages aux biens, des perturbations sociales et économiques ou une dégradation de l'environnement ».

Cette définition implique ainsi de manière explicite une autre notion : celle de l'exposition à un événement donné. Là encore, le MSPQ (2008) possède sa propre caractérisation de l'exposition, qui consiste en la « situation par laquelle sont mis en relation, dans un milieu donné, un aléa potentiel et les éléments pouvant être soumis à sa manifestation ».

Un système exposé est ainsi un système qui, à un instant donné, dans un espace donné, possède des éléments pouvant être affectés par un aléa. La sensibilité de ce système peut alors se résumer à une mesure du niveau d'exposition auquel il peut être soumis avant de subir les conséquences des impacts de cet aléa, et aussi du degré d'importance de ces conséquences.

Dans le domaine des changements climatiques, la sensibilité d'un système se base sur le « degré auquel un système est influencé, positivement ou négativement, par la variabilité du climat ou les changements climatiques » (GIEC, 2007a). La notion de gradation des conséquences pour un système exposé se retrouve ainsi dans le cas particulier des changements climatiques.

La définition de la sensibilité ainsi retenue sera celle de la sensibilité comme degré d'importance des conséquences pouvant être subies par un système donné. Plus un système sera sensible à un aléa donné et plus les conséquences de cet aléa seront importantes pour lui.

1.4.2 Criticité

D'après le Petit Robert (2012), la notion de criticité ou de système critique « caractérise le seuil extrême d'une discontinuité physique » ou encore ce qui « amène un changement important » . Dans ce contexte, la criticité semble imposer à l'élément considéré comme une sorte de limite qu'il ne faut pas dépasser, ou dont le dépassement entraînerait de graves conséquences pour le système ou l'élément critique.

En gestion des risques, dans la méthode AMDEC, la criticité correspond à un indicateur de l'importance des impacts d'un mode de défaillance d'un système donné, et en ce sens elle semble très proche de la notion de sensibilité. Elle peut être rapprochée d'« une mesure de la valeur qu'on est prêt à dépenser pour se soustraire à ses effets » (Mortureux, 2005). Son évaluation pour un mode de défaillance (une panne, un dysfonctionnement potentiel) est basée sur la combinaison de plusieurs caractéristiques :

- *La gravité des conséquences* qui consiste en une pondération des conséquences du mode de défaillance par leur probabilité d'occurrence;
- *La fréquence du mode de défaillance*;
- *La détectabilité* qui mesure dans quelle mesure les conséquences du mode de défaillance vont être atténuées dans le cas où il serait détecté.

Dans le cadre des travaux présenté dans ce mémoire, la définition retenue pour la criticité se situera au niveau d'un équipement, d'un élément d'un système essentiel. Pour reprendre cette idée de seuil de la définition générale de la criticité, il est possible de considérer que la criticité d'un élément au sein d'un système dépend de la place qu'il occupe dans ce système.

Ainsi si l'élément occupe une place extrêmement cruciale, les conséquences pour le système, voire l'ensemble du réseau, peuvent s'en retrouver excessivement aggravées en cas de défaillance. La définition retenue conserve ainsi à la fois les notions de seuils et d'amplification des effets en cas de dépassement de ce dernier.

1.4.3 Vulnérabilité

De nos jours, la question de la vulnérabilité est au cœur d'un grand nombre de problématiques en sécurité civile. Les définitions de la vulnérabilité sont multiples et sont souvent adaptés aux domaines dans lesquels on y fait référence : vulnérabilité en sécurité civile, en hydrologie, en psychologie, ... Sur le plan étymologique elle peut se traduire comme étant une caractérisation de ce « qui peut être blessé, frappé par un mal ou qui peut être facilement atteint, se défend mal. » (Le Petit Robert, 2012). Ceci réfère à la notion de conséquences d'un évènement donné et de la capacité à les subir ou non.

Aux yeux du MSPQ (2008) la vulnérabilité constitue « une condition résultant de facteurs physiques, sociaux, économiques ou environnementaux, qui prédispose les éléments exposés à la manifestation d'un aléa à subir des préjudices ou des dommages ». Il existe ainsi la notion d'un certain potentiel, d'un ensemble de conditions favorables à l'apparition de défaillances en cas d'aléas. Cette caractérisation peut être couplée avec celle de l'exposition, présentée plus haut dans ce mémoire, et donc implique également dans une certaine mesure celle de sensibilité.

Le MSPQ (2008) définit également trois composantes caractéristiques de la vulnérabilité d'un élément exposé à un aléa :

- le degré d'exposition;
- l'importance stratégique;
- la sensibilité.

En y incorporant l'« importance stratégique », le MSPQ (2008) ouvre ainsi la porte à la criticité au sens retenu dans ce mémoire dans sa conception de la vulnérabilité. Il existe ainsi une corrélation entre la sensibilité et la criticité d'un élément.

D'une manière générale, la plupart des diverses définitions de la vulnérabilité semblent s'accorder sur le fait qu'elle constitue « le degré à partir duquel un système est susceptible de défaillir, d'être endommagé, de tomber » (Smit, Burton, Klein, & Wandel, 2000).

La vulnérabilité d'un système face aux changements climatiques est ainsi établie comme étant la « mesure dans laquelle un système est sensible – ou incapable de faire face – aux effets défavorables des changements climatiques, y compris la variabilité du climat et les phénomènes extrêmes. » (GIEC, 2007a). Là encore apparaît le lien étroit qui subsiste entre vulnérabilité et sensibilité. Le GIEC précise que « la vulnérabilité est fonction de la nature, de l'ampleur et du rythme de la variation du climat à laquelle le système considéré est exposé, de la sensibilité de ce système et de sa capacité d'adaptation » (GIEC, 2007a).

Dans chacun des cas, la vulnérabilité est fonction de l'ampleur d'un aléa et/ou de ses conséquences, couplée à des capacités propres au système étudié qui déterminent l'ampleur des conséquences de cet aléa. Un aspect temporel est également abordé dans la précédente définition du GIEC, la vulnérabilité étant potentiellement liée à la variabilité climatique, elle dépend ainsi potentiellement des modifications du climat au cours du temps. Il est en outre à noter que ces définitions considèrent un système (un ensemble d'éléments donc) et non pas un élément spécifique, contrairement à celle du MSPQ.

Plus précisément, le CRP définit la vulnérabilité comme étant « une propriété, évolutive dans le temps, d'un système à subir des défaillances en fonction de son état » (Pageon, 2008). L'évolution de la vulnérabilité d'un système au cours du temps est là encore mise en avant, couplée à la notion de conséquences négatives et d'altérations de son état. Toujours selon le CRP, la notion de vulnérabilité se base sur trois dimensions (Petit & Robert, 2009) :

- *Le système est conçu fondamentalement pour fournir un service ou une ressource;*
- *La défaillance correspond à la dégradation de ce service fourni (ou ressource fournie);*
- *Le système varie dans le temps au niveau : de ses propres besoins et des services (ou ressources) qu'il fournit.*

La vision du CRP est ainsi que sous l'action du temps ou de successions d'aléas, l'aptitude du système à fournir les ressources ou les services pour lesquels il a été conçu peut être amenée à se dégrader.

Cette dégradation peut ainsi mener à l'apparition de défaillances du système, d'interruptions des services fournis ou encore d'altérations des ressources, et ce potentiel progressif de défaillance constitue sa vulnérabilité.

En se basant sur ces diverses définitions, il est possible de considérer à l'instar du MSPQ une vision de la vulnérabilité comme combinaison de la sensibilité et de la criticité d'un élément donné. La sensibilité représente ici à la fois l'exposition à un aléa et la gravité des conséquences de celui-ci sur l'élément, et la criticité la place que cet élément occupe dans l'ensemble du réseau de systèmes considéré. C'est cette définition qui sera retenue pour la suite de ce mémoire.

1.5 Les systèmes experts

La caractérisation de la vulnérabilité passe donc par une analyse complexe avec un grand nombre de paramètres interconnectés dont la compréhension globale nécessiterait les visions conjointes de plusieurs experts. Dans le cas de la présente étude, comme le rappelle la Figure 1-1, la vision adoptée de la problématique de vulnérabilité des régions aux changements climatiques se situe à la frontière des domaines d'expertise sur les CC et sur les SE.

Ne disposant pas ainsi directement des connaissances dont bénéficient les experts de ces deux domaines, le recours à un système permettant de synthétiser ces savoirs afin de les combiner et de leur donner une application spécifique s'avère nécessaire. C'est précisément dans ce but que le choix va être fait de se tourner vers un système expert.

1.5.1 Notions de base

Un système expert est un outil informatique dont le but est d'imiter le comportement et le processus décisionnel d'un expert humain dans un domaine particulier (Gondran, 1986). Il se base à la fois sur une représentation d'un certain volume de connaissance se rapportant à ce domaine et sur un processus de démonstration automatique appuyé par ces connaissances.

L'outil ou le logiciel va les organiser au moyen d'un ensemble de règles logiques et les utiliser afin de résoudre le problème qui lui est posé. La figure 1-5 montre le concept de base d'un système expert :

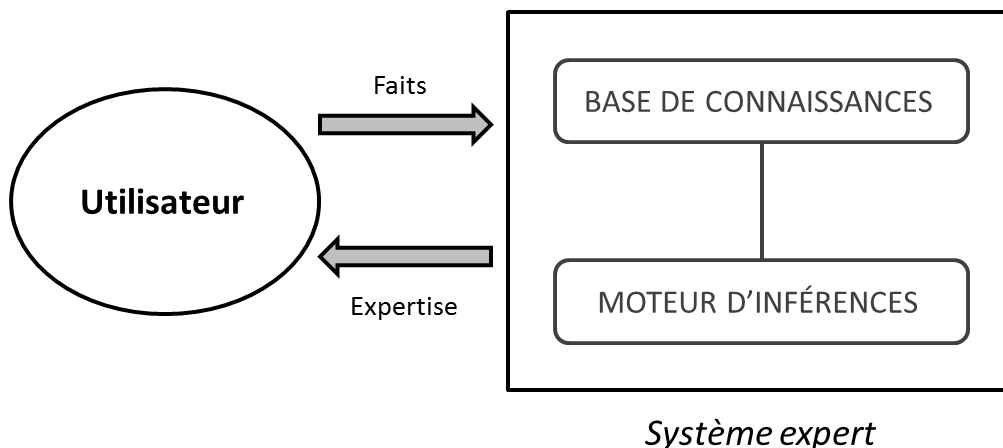


Figure 1-5 : Concept de base d'un système expert (adapté de Giarratano, 1998)

Pour résoudre le problème, l'utilisateur doit en premier lieu fournir un certain nombre de faits afin de renseigner et d'étayer la base de connaissances du système. Par la suite ce dernier va produire une expertise adaptée aux informations dont il dispose à la fois sur le problème spécifique qui lui a été soumis et sur son domaine d'application.

De façon plus pratique, un système expert se compose de deux parties principales (Gondran, 1986) :

- *Une base de connaissances* qui renferme des informations organisées en une base de faits et une base de règles liant ces faits;
- *Un moteur d'inférence* qui contient la logique permettant d'établir de nouveaux faits à partir de la base de connaissances et de construire le raisonnement.

Le principe du moteur d'inférence (ou démonstrateur de théorèmes) va être de produire le raisonnement du système expert en vérifiant si les relations qui unissent les faits sont respectées ou s'il convient pour se faire de constituer de nouveaux faits en accord avec la logique implémentée. Il existe à ce propos trois types de logique pour un moteur d'inférence (Gondran, 1986) :

- *Le chaînage avant* qui consiste à raisonner des faits formulés vers une conclusion;
- *Le chaînage arrière* qui consiste à chercher les faits qui soutiennent une hypothèse formulée;
- *Le chaînage mixte* qui emploie une combinaison des deux précédentes logiques.

La construction du raisonnement est un processus itératif qui va, à chaque étape, déterminer quelles sont les règles qui s'appliquent, appliquer ces règles, puis mettre à jour la base de faits et ajouter ainsi les faits qui ont pu être créés par l'application des règles au cours de l'étape.

A l'issue du processus, l'utilisateur possède une base de l'ensemble des faits avérés et dispose ainsi des conclusions de l'expertise du système.

1.5.2 Exemples d'applications

Les systèmes experts peuvent être employés dans une grande variété de domaines d'expertise, l'une des principales limites à leur emploi étant la possibilité d'en retranscrire les connaissances dans un langage et un ensemble de faits et de règles interprétable par le système.

La toute première utilisation d'un système expert a été celle de DENDRAL, créé en 1965 par Edward Feigenbaum, Bruce Buchanan (informaticiens), Joshua Lederberg (médecin) et Carl Djerassi (chimiste). Ce système avait pour fonction, à partir de données physiques telles que celles fournies par la spectrométrie de masse, de déterminer la composition chimique d'un matériau (Jackson, 1990). Par la suite il en fut tiré un moteur pour la création de nouveaux systèmes experts appelé META-DENDRAL.

Un autre système essentiel bien connu est MYCIN en 1972, dont la fonction était de guider un médecin non familier avec les antibiotiques pour le traitement des infections sanguines. (Jackson, 1990). Il était composé de cinq parties majeures :

- *La base de connaissances;*
- *La base de données dynamique sur les patients* qui permettait de recenser les informations sur les cas de patients particuliers;

- *Le programme de consultation* qui pose des questions, tire des conclusions et donne des conseils sur un cas spécifique à partir des informations sur le patient et des connaissances;
- *Le programme d'explication* qui répond aux questions et justifie ses conseils;
- *Le programme d'acquisition de connaissances* qui permet l'ajout de nouvelles règles ou la modification des anciennes.

Comme évoqué plus haut, l'emploi des systèmes experts ne se limite pas aux seuls champs de la médecine et de la chimie. Il convient de mentionner dans le tableau 1-3 quelques autres exemples de domaines d'expertise dans lesquels les systèmes essentiels ont également leur place (Liebowitz et al., 1998) :

Tableau 1-3 : Exemples de systèmes experts par secteurs

SECTEUR	SYSTÈMES EXPERTS
<i>Industrie de l'énergie</i>	KNOBOS, ADVISOR, TIGER, GEMS, OASYS
<i>Planification</i>	O-Plan2, TOSCA, AMP, UNIK, GUESS
<i>Télécommunications</i>	NYNEX's MAX, TCAF, PERFEX
<i>Ingénierie logicielle</i>	PECOS, Professor Marvel, PA, STES
<i>Finances et investissements</i>	AESOP, CREDEX, COMPASS, CUBUS, KABAL
<i>Comptabilité et audit</i>	TICOM, ARISC, TAXMAN, FALCON, Planet
<i>Gestion des ressources naturelles</i>	PROSPECTOR, LITHO, Geo-X, PHOENIX, SEA
<i>Secteur militaire</i>	Blacksmith, SABRE, PRIDE, TED, Soar/IFOR
<i>Agriculture</i>	COMAX, CALEX, UNU-AES, CERES

En choisissant de développer un système expert, il est possible d'obtenir un outil modulable permettant de jouer sur les données du problème à l'étude afin de pouvoir en tirer des expertises et des analyses pertinentes amenant à une meilleure compréhension des différents enjeux du problème.

C'est en suivant ce concept que sera conçue la méthodologie d'évaluation de la vulnérabilité des systèmes essentiels face aux changements climatiques, en s'inspirant des démarches à l'origine des systèmes experts pour lui donner la même flexibilité et la même modularité. Comme le rappelle la figure 1-1, il est nécessaire pour son développement de conjuguer les expertises de deux domaines bien distincts. Ces expertises n'étant pas disponibles directement dans la mesure où les présents travaux ne sont ni effectués par un spécialiste des SE, ni par un spécialiste des CC, les implémenter au travers d'une approche similaire à celle d'un système expert semble approprié.

CHAPITRE 2 DÉVELOPPEMENT DE LA MÉTHODE

2.1 Description de la méthodologie

Après avoir caractérisé les principales notions abordées dans ce mémoire, il appartient de présenter le cheminement qui a conduit au développement de la méthodologie d'évaluation de la vulnérabilité aux changements climatiques. Ce développement se déroule en quatre étapes :

- choix des paramètres;
- construction des bases de connaissances;
- élaboration de la base de règles;
- combinaison des deux bases.

Ces étapes serviront de canevas à la construction d'une méthode inspirée de l'architecture des systèmes experts. En accord avec la définition retenue de la vulnérabilité, la méthodologie va s'articuler autour de deux grands axes :

- *Une caractérisation de la sensibilité* qui déterminera dans quelles proportions un équipement peut être exposé aux conséquences négatives d'un aléa;
- *Une évaluation de la criticité* dont le but sera de qualifier la place qu'occupe ce même équipement au sein du réseau des infrastructures essentielles.

Pour chacun de ces axes, il conviendra de choisir des paramètres adaptés et représentatifs qui guideront ensuite les présents travaux vers une caractérisation de la sensibilité et de la criticité d'un équipement donné. À partir de ces deux propriétés il sera alors possible de déterminer la vulnérabilité de l'équipement par des jeux de combinaisons qui seront détaillés plus loin dans la base de règle.

2.2 Choix des paramètres

2.2.1 Caractéristiques communes des changements climatiques

Les changements climatiques se manifestent d'une multitude de façons différentes et ont ainsi un large éventail de conséquences multiples et variées sur nos sociétés (Ouranos, 2010b). Cet aspect multi-impacts rend difficile toute évaluation de la vulnérabilité des SE relative à ces changements.

Il importe ainsi de se focaliser sur un certain nombre de conséquences représentatives des CC, et ce afin de pouvoir en tirer des paramètres d'évaluation caractéristiques. Il est avéré que l'une de ces principales conséquences est la multiplication et l'intensification des phénomènes climatiques extrêmes, bien que les conséquences des changements climatiques ne se limitent pas à ces extrêmes météorologiques. (GIEC, 2007c).

Ces phénomènes peuvent être de tout type : augmentation globale des températures extrêmes, prolongation des périodes de canicule, accentuation du redoux hivernal, multiplication des volumes de précipitations, etc... (Ouranos, 2010b). La gamme de leurs impacts est ainsi plutôt variée et symptomatique des CC globaux, et la notion de conséquences d'un événement donné est aussi mieux rendue. Ces impacts des extrêmes météorologiques sont également directement observables, ainsi que leurs conséquences sur nos sociétés actuelles.

Par ailleurs, dans son étude de la vulnérabilité des infrastructures canadiennes au changement climatique, le Conseil Canadien des Ingénieurs ([CCI], 2008) dresse une liste des différents événements climatiques extrêmes qui servent de base à leur évaluation qualitative et quantitative de la vulnérabilité au changement climatique. Parmi eux se retrouvent les conséquences précédemment énoncées, considérées ainsi comme représentatives des changements globaux que connaît le climat depuis des décennies.

A la manière du CCI, le choix a été fait de se concentrer sur les conséquences des événements climatiques extrêmes, en posant comme postulat de recherche que celles-ci sont symptomatiques de celles des changements climatiques globaux :

Postulat 1 : les conséquences des changements climatiques se réduisent aux conséquences des évènements climatiques extrêmes.

Encore une fois, les conséquences des changements climatiques ne se limitent pas qu'aux conséquences de tels extrêmes, celles découlant de l'évolution de la variabilité du climat n'étant par exemple pas prises en compte. Ainsi Füssel et Klein (2006) soulignent les liens existants entre la variabilité climatique et les changements du climat, ainsi que l'importance de l'association de ces deux notions dans les analyses de vulnérabilité.

Toutefois, le postulat permet de partir du fait que les seules conséquences des évènements extrêmes sont assez représentatives et assez diverses pour permettre de poser les bases d'une analyse de la vulnérabilité aux conséquences des changements climatiques.

À partir de ce postulat et en s'inspirant des travaux effectués par le CCI, il est possible de dresser une liste des différents événements climatiques (EC) dont les conséquences seront étudiées (adapté de Conseil canadien des ingénieurs, 2008) :

- inondations;
- vagues de chaleur;
- pluies intenses;
- sécheresses;
- tempêtes de verglas / blizzard;
- vents violents / tornades;
- grêle;
- montée du niveau de la mer;
- ondes de tempête.

Les évènements retenus et listés ci-dessus seront considérés comme étant les plus représentatifs et ceux dont les conséquences sont les plus significatives sur les SE. Une fois cette liste établie, il convient d'identifier quelles sont les propriétés communes à ces divers phénomènes.

Celles-ci serviront à définir différents grands facteurs climatiques (FC), qui peuvent être considérés comme des catégories d'impacts climatiques sur les infrastructures des systèmes essentiels. Au vu de la densité de résultats et par souci de clarté, l'analyse complète sera exposée à l'Annexe 1 de ce mémoire. Néanmoins, pour bien comprendre le raisonnement mené ici, certains résultats pour quelques EC sont présentés dans les tableaux 2-1 et 2-2 :

Tableau 2-1: Conséquences de l'évènement "Inondation" (adapté de Associated Program on Flood Management, 2006; Centre Européen de Prévention du Risque d'Inondation, 2010; Hausmann, 1999; Vigneron, 2005)

EVENEMENT CLIMATIQUE (EC)	CONSÉQUENCES
<i>INONDATION</i>	Dégradation / destruction des bâtiments et infrastructures routières par l'action du courant
	Pannes et dégradations diverses des systèmes électriques par l'action de l'humidité
	Réduction de l'accès à l'eau potable
	Destruction des cultures
	Augmentation des risques sanitaires
	Rémanence des effets (corrosion, infiltration)
	Dégâts divers par charriage de débris

Tableau 2-2 : Conséquences de l'évènement "Vents violents / Tornades" (adapté de Direction de la santé environnementale et de la toxicologie, 2010; Dubrion, 2008; Riser, 2010)

EVENEMENT CLIMATIQUE (EC)	CONSÉQUENCES
VENTS VIOLENTS / TORNADES	Dégradation / destruction des bâtiments et infrastructures routières par l'action des vents
	Dégâts divers par projections de débris
	Destruction des systèmes électriques aériens
	Destruction des cultures
	Augmentation des risques sanitaires

A partir de l'ensemble de ces données recueillies sur les conséquences des événements extrêmes il est à présent possible d'identifier les grandes tendances communes à tous ces événements. Pour les travaux présentés ici il est important de se restreindre à un petit nombre de FC pour le moment, dans la mesure où il s'agit d'une étude préliminaire à l'élaboration d'un outil d'évaluation complet. Pour effectuer le choix des tendances, des caractéristiques communes, l'adoption d'un deuxième postulat s'avère nécessaire :

Postulat 2 : *les conséquences des CC sur le bien-être et la santé de la population se réduisent à celles découlant des conséquences physiques de ces mêmes CC sur les SE.*

Ce postulat se justifie par le fait que les systèmes essentiels sont les supports vitaux du bien-être des populations qu'ils desservent. Par conséquent l'interruption ou la défaillance d'un ou plusieurs de ces systèmes consécutivement aux conséquences physiques des CC altère la qualité de vie des citoyens de manière directe. En ne tenant pas compte des bilans humains dans ces conséquences communes, cela permet de se focaliser uniquement sur l'aspect systèmes essentiels, ce qui est l'objectif des présents travaux.

Le choix des composantes communes qui vont être retenues pour la méthodologie d'évaluation de la vulnérabilité va ainsi se porter sur les éléments suivants, qui constitueront les facteurs climatiques principaux :

Humidité :

Ce facteur caractérise une variation du taux d'humidité par rapport au taux moyen du à l'EC, principalement dans les cas de hausse du taux d'humidité dans l'air ambiant. Il se manifeste notamment dans les cas d'inondations, de pluies intenses ou encore de tout autre phénomène perturbant les bilans hydriques et hydrologiques d'un territoire donné. Ces phénomènes auront tendance à s'intensifier et à se multiplier au Québec au cours des prochaines années (Ouranos, 2010b), aussi est-il pertinent d'en faire un des facteurs climatiques déterminants de la méthodologie.

Température :

Ce facteur sert à l'évaluation d'une hausse de la température consécutive à la manifestation d'un événement climatique. Le choix d'un tel paramètre est notamment motivé par le fait que la tendance globale des températures s'oriente à la hausse pour les prochaines décennies à venir. Il sera possible d'évaluer ce paramètre en considérant des valeurs relatives d'écarts de températures par rapport aux températures moyennes enregistrées au cours d'une certaine période.

Niveau d'eau :

L'augmentation du niveau d'eau par rapport à un niveau moyen donné est caractérisée par ce facteur. Là encore le choix d'une telle donnée est motivé par les tendances climatiques observées et projetées pour les prochaines années à venir (GIEC, 2007c).

Actions mécaniques :

Ce dernier facteur est un des plus importants, car il mesure la nature et l'ampleur des conséquences physiques directes (dégradations, dommages, etc...) d'un événement climatique, ce qui en fait un élément important dans l'étude de vulnérabilité. Dans la mesure où il existe une grande diversité de manifestations physiques de ce type, il convient de définir trois sous-catégories d'actions mécaniques :

- *Les débits et les flux de matières* (type A) qui peuvent prendre la forme de vents ou de courants forts au niveau d'un élément donné;
- *Les poids et les pressions* (type B) qui caractérisent des accumulations de charges sur un élément donné;
- *Les collisions et les déplacements* (type C) qui représentent les chocs et les mouvements subis par un élément au cours de l'EC.

En comptant ces dernières subdivisions, il a ainsi été possible d'identifier six grands facteurs climatiques (FC) caractérisant au mieux les différents événements et aléas climatiques.

Tous ces éléments caractéristiques correspondent à des mesures relatives ou qualitatives de paramètres physiques directement connectés à l'événement considéré, et c'est pourquoi les dénominations de ces facteurs climatiques se substituent à celles des paramètres physiques dont ils sont inspirés (le terme « Température » désigne ainsi à la fois le facteur climatique et la grandeur physique qu'il mesure). Les intensités de ces FC seront évaluées au moyen de diverses échelles qui sont présentées dans l'Annexe 3. Le tableau 2-3 montre les correspondances qui sont faites entre paramètres physiques et facteurs climatiques :

Tableau 2-3: Correspondances facteurs climatiques / évènements climatiques

		ÉVÉNEMENTS CLIMATIQUES (EC)								
		INONDATION	VAGUE DE CHALEUR	PLUIE INTENSE	SÉCHERESSE	VERGLAS / BLIZZARD	VENTS VIOLENTS	GRÊLE	MONTÉE MER	ONDE DE TEMPÊTE
FACTEURS CLIMATIQUES (FC)	<i>Humidité</i>									
	<i>Température</i>									
	<i>Niveau d'eau</i>									
	<i>Actions mécaniques</i>									

Par lecture sur le tableau, il est ainsi possible de remarquer que l'EC « Pluie intense » fait intervenir les facteurs climatiques « Humidité », « Niveau d'eau » et « Actions mécaniques », qui constituent ainsi les grands types de conséquences de ce genre d'évènement. Les trois types d'actions mécaniques ont par ailleurs été regroupés par commodité de lecture.

Ces différents facteurs climatiques identifiés vont servir de paramètres pour l'évaluation de la vulnérabilité des SE aux conséquences des changements climatiques dans la mesure où ils servent de mesure des effets physiques de ces CC sur des infrastructures municipales. Chacun d'entre eux est également caractéristique d'une grande catégorie de conséquences.

Outre ces effets et conséquences physiques sur les systèmes, il faut aussi considérer la notion de durée de ces conséquences. En se référant à la définition de la vulnérabilité selon les critères du CRP, il apparaît qu'il est nécessaire d'adjoindre la composante temporelle aux paramètres nécessaires aux analyses, dans la mesure où la vulnérabilité évolue en fonction du temps (Petit & Robert, 2009). Il convient de formuler alors un nouveau postulat pour cette étude :

Postulat 3 : l'intensité et la persistance des conséquences d'un évènement climatique sont considérées dans un premier temps comme directement liées à sa durée.

Il est possible de justifier ce postulat par le fait qu'il y a accumulation des effets au cours du temps en cas de longue durée d'un évènement climatique. S'il y a accumulation, il y a ainsi une augmentation de l'intensité des conséquences de ces effets, ne serait-ce que parce que bien souvent interviennent des dégradations irréversibles après un certain temps, comme dans le cas d'une inondation. Par ailleurs, indépendamment de ces considérations temporelles, les systèmes essentiels ne sont pas les seuls à être touchés par les conséquences des CC : les ressources et les milieux naturels ne sont pas non plus épargnés (Warren, 2004). Les paramètres suivant permettent de tenir compte de ces deux aspects spécifiques des changements climatiques :

Durée de l'évènement :

Plus l'évènement en lui-même dure, plus ses conséquences auront des impacts importants sur les équipements touchés, dans le cas notamment où aucune action correctrice n'est déployée. Aussi il conviendra de considérer dans les paramètres de caractérisation des évènements climatiques la durée de ces évènements, durée qui pourra être évaluée selon plusieurs plages de temps.

D'éventuelles considérations de la durée directe des conséquences et de la fréquence des évènements climatiques pourront être envisagées par la suite, par un recours aux historiques des conditions climatiques par exemple.

Dégradation des matières premières :

Certains systèmes essentiels peuvent requérir certaines ressources issues des environnements naturels pour fonctionner ou pour fournir leurs services, aussi tout impact sur ces ressources peut alors entraîner des impacts sur le fonctionnement de ces infrastructures. Ces ressources particulières qui sont extraites de divers milieux naturels et transformées par un système essentiel pour remplir ses fonctions (que ce soit la fourniture de services ou d'autres ressources) seront qualifiées de « matières premières » (MP).

Il sera ainsi pris en compte dans ces travaux de la capacité de certains évènements climatiques à altérer ou non un certain nombre de matières premières. Par la suite, il pourrait être intéressant de prendre en compte la fréquence des EC dans l'altération des ressources spécifiques que sont les MP, donnant ainsi une composante temporelle présentement manquante à l'évaluation de son état.

2.2.2 Caractéristiques des systèmes essentiels

Après avoir mis en lumière les composantes communes aux changements climatiques, il convient à présent d'identifier les paramètres propres aux systèmes essentiels. Ces paramètres serviront ensuite à l'évaluation de la vulnérabilité de ces SE face aux conséquences des changements climatiques.

Comme cela a été montré plus haut dans ce mémoire, les systèmes essentiels existent sous diverses formes : équipements, infrastructures, réseaux de services, etc...

D'une manière générale il est possible de les considérer comme étant des réseaux d'infrastructures et d'équipements ayant pour fonction de fournir des ressources ou des services essentiels à des utilisateurs. Aussi pour le CRP, ces systèmes peuvent se décomposer en différents « ensemble fonctionnels » qui regroupent différents éléments interconnectés, des infrastructures, des équipements ou des organismes par exemple (Robert et al., 2009).

Ces ensembles fonctionnels jouent chacun un rôle spécifique qui permet la fourniture d'une ou plusieurs ressources données (extrants) en s'appuyant sur des ressources mises à disposition par des fournisseurs (intrants).

La figure 2-1 montre une représentation théorique de l'approche système employée par le CRP et qui servira de point de départ à l'identification des paramètres spécifiques aux SE :

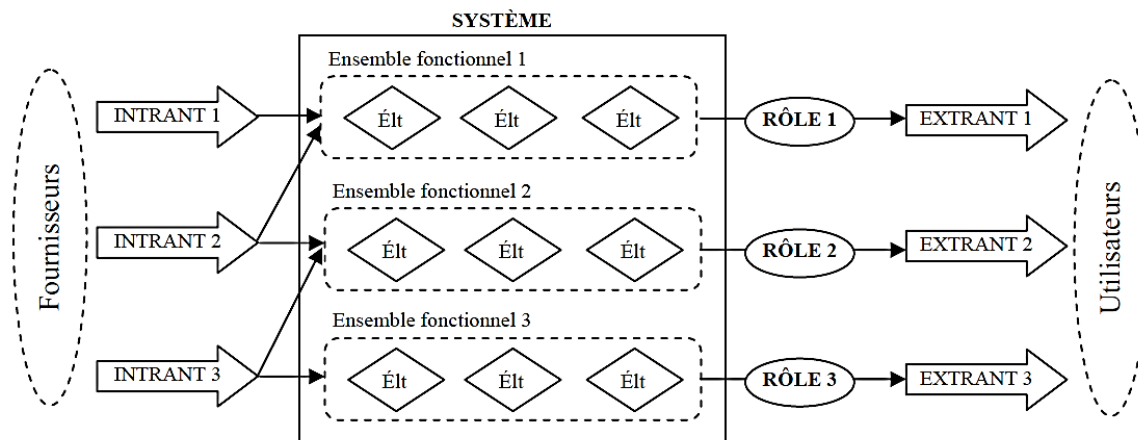


Figure 2-1: Représentation théorique d'un système (tiré de Robert et al., 2009)

A l'aide de la représentation ci-dessus (Figure 2-1) et en tenant compte du fait que les SE présentent des interdépendances entre eux, il est aisé de voir comment la défaillance d'un ensemble fonctionnel ou encore d'un de ses éléments peut influencer sur tout un ensemble de systèmes. En effet, le caractère interdépendant vient du fait que les « fournisseurs » et « utilisateurs » sont d'autres systèmes et dépendent des intrants et des extrants qu'ils s'échangent entre eux et donc des défaillances potentielles de ces échanges. En se basant sur cette notion d'interdépendances et d'effets domino, il convient d'établir un nouveau postulat de recherche pour les présents travaux :

Postulat 4 : *les défaillances des éléments constitutifs des ensembles fonctionnels sont symptomatiques des défaillances du SE tout entier dont ils font partie.*

Pour l'élaboration de la méthodologie d'évaluation de la vulnérabilité, il sera ainsi choisi de se placer au niveau élémentaire des SE, à savoir donc au niveau des éléments constitutifs des ensembles fonctionnels et ainsi plus spécifiquement des équipements.

En accord avec les postulats posés plus haut dans ce mémoire, les paramètres qui seront considérés seront relatifs à des caractéristiques physiques de ces équipements, dans la mesure où le choix a été fait de considérer les impacts physiques des CC sur les SE (Postulats 2 et 4).

Ces paramètres devront être représentatifs des affectations potentielles d'un équipement lorsqu'il est soumis à un aléa climatique donné.

2.2.2.1 Caractérisation des différents types d'équipements

La notion d'équipement peut paraître relativement vague, aussi il est nécessaire de la clarifier et de définir les paramètres nécessaires à la caractérisation des conséquences d'un aléa pour un équipement. Au sens littéral, le terme « équipement » désigne un ensemble d'outils, d'appareils employés dans un service, une entreprise, une infrastructure voire une municipalité (Dictionnaire Larousse, 2012). Il apparaît ainsi que cette notion se rapproche de celle d'une machine, voire d'un système automatisé. Ce dernier aspect est particulièrement intéressant, car les applications de tels automates sont nombreuses et peuvent se montrer représentatives de la large gamme des équipements utilisés par les systèmes essentiels.

Un système automatisé se compose de trois parties distinctes (Moreno & Peulot, 2009):

- *La partie opérative* qui contient les différents mécanismes et qui effectue la tâche du système automatisé;
- *La partie relation (ou interface)* qui renferme capteurs et commandes permettant à un utilisateur d'interagir avec le système automatisé;
- *La partie commande* qui regroupe tous les organes traitant et transmettant les instructions que doit suivre le système pour exécuter sa tâche.

C'est à la partie opérative qu'il convient de s'intéresser à présent, et plus spécifiquement à la notion d'actionneurs. Ces derniers constituent des éléments critiques du système automatisé, car ce sont eux qui transforment une énergie d'entrée en une énergie de sortie qui permettra la réalisation des actions que l'automate est tenu d'effectuer (Hubert, 2008).

Sans actionneurs en état de marche, le système ne pourra faire fonctionner le moindre mécanisme de sa partie opérative et se verra ainsi qualifié de défaillant. En se basant sur ces considérations, il est possible d'établir un nouveau postulat :

Postulat 5 : les équipements sont assimilables à des systèmes automatisés dont les actionneurs sont considérés comme étant les éléments les plus critiques.

Une classification des équipements peut ainsi être effectuée en considérant les différents couples d'énergies entrée/sortie transformés par les diverses technologies d'actionneurs. Il est possible de classer sept types d'énergies (Encyclopédie Larousse, 2012):

- Mécanique (M);
- Hydraulique (H);
- Thermique (T);
- Électrique (E);
- Chimique (C);
- Rayonnante (R);
- Nucléaire (N).

L'annexe 4 donne par ailleurs différents exemples de choix technologiques en fonction du couple d'énergies considéré, et ce sont ces choix technologiques d'actionneurs qui vont servir de premier paramètre caractéristique des équipements des SE.

Ces choix technologiques vont permettre de faire la différence en termes de défaillances potentielles suite à un même aléa climatique entre deux équipements données. En effet, toutes ces technologies d'actionneurs ne vont pas être affectées de manière identique selon le facteur climatique et les impacts physiques considérés. Le paramètre associé à cette notion est alors le suivant :

Couple d'énergies de l'actionneur :

Ce paramètre ne se limite pas à la caractérisation du choix technologique retenu pour la conception de l'équipement, mais sert également d'estimateur de l'ampleur des conséquences qu'il peut subir. Toutes les technologies d'actionneurs n'ont en effet pas la même résistance face à certains facteurs climatiques, pas le même potentiel d'impact en quelque sorte selon le facteur climatique considéré. Ainsi il convient d'adjoindre cette notion de potentiel d'impact (qui peut être rapprochée de la sensibilité de l'équipement) qui est fonction de la technologie et du facteur climatique considéré. Cette caractérisation peut se faire au moyen de tables décrivant ces propriétés pour un facteur climatique donné, tables qui sont données dans l'annexe 2 et qui serviront dans les analyses à venir. Le tableau 2-4 donne un exemple de ces tables pour le facteur « Température », les valeurs qui sont censées y figurer varient selon l'équipement considéré (des exemples des actionneurs sont donnés à l'annexe 4):

Tableau 2-4 : Exemple de table du potentiel d'impact du FC "Température" sur un équipement

	M	H	T	E	C	R	N
M	θ_{MM}	θ_{MH}	θ_{MT}	θ_{ME}			
H	θ_{HM}	θ_{HH}					
T	θ_{TM}		θ_{TT}		θ_{TC}		
E	θ_{EM}		θ_{ET}	θ_{EE}	θ_{EC}		
C	θ_{CM}		θ_{CT}	θ_{CE}	θ_{CC}		
R			θ_{RT}	θ_{RE}	θ_{RC}		
N			θ_{NT}				

Par exemple, si l'analyse se porte sur un équipement comportant un actionneur de type « Amplificateur de pression », la lecture du tableau de l'annexe 4 indique que son couple d'énergies est « Hydraulique - Hydraulique » (HH). Par lecture de l'annexe 2, pour un tel couple il est possible d'obtenir la valeur du potentiel d'impact de l'équipement par rapport au FC « Température », qui se lit à l'intersection de la ligne H et de la colonne H. Ce qui donne ainsi la valeur du paramètre $\theta_{HH} = 1$ pour cet équipement muni de ce type d'actionneur.

2.2.2.2 Paramètres relatifs à la protection des équipements

Dans un premier temps, puisqu'il est ici question d'impacts physiques des CC, il paraît important de considérer la notion de protection. En effet, six grands types de conséquences physiques des changements climatiques ont été précédemment identifiées (les facteurs climatiques), et ces dernières n'auront pas les mêmes impacts et n'auront pas les mêmes chances de provoquer des défaillances en fonction de l'absence ou de la présence de protections spécifiques. Par conséquent, les premiers paramètres à considérer sont :

Protection contre l'humidité :

Il caractérise la présence ou non de mesures contre l'humidité importante comme des déshumidificateurs.

Protection contre les températures :

La présence ou l'absence de ventilateurs, de systèmes de climatisation ou tout autre procédé d'évacuation de la chaleur est prise en compte par cet indice.

Protection contre le niveau d'eau :

La mise en place de digues, de dispositifs anti-crues, ou encore de systèmes d'étanchéité est qualifiée par ce paramètre.

Protection contre les actions mécaniques (selon le type):

Ce facteur recense les protections mises en place contre les différentes formes d'impacts physiques que peut subir l'équipement. Entre autres choses, il prend en considération la présence de dispositifs de protections comme des blindages (type C), des valves anti-surpressions (type B) ou des renforts (type A).

Certains équipements seront ainsi protégés ou non contre ces conséquences physiques de par leur conception originelle et il faudra tenir compte de cette notion de protection dans l'évaluation de la vulnérabilité des systèmes auxquels ils sont associés. Par ailleurs, la protection d'un équipement donné face à un aléa climatique ne se résume pas seulement à des dispositifs matériels.

Il peut exister pour certaines infrastructures ou équipements un certain nombre de politiques de gestion et de contrôle dont la fonction est de limiter l'ampleur des conséquences de tout aléa les affectant. De plus il faut tenir compte dans les analyses futures des procédures de maintenance mises en place par les gestionnaires et responsables du réseau dont l'équipement fait partie. Si un processus d'entretien a été mis en place, il apparaît que cela va influencer la capacité des équipements à subir des défaillances importantes, et donc leur vulnérabilité. Il importe de considérer ainsi les autres paramètres suivants :

Mesures spécifiques :

L'évaluation de cet indice sert à définir si des politiques de gestion, de veille ou de toute autre type de mesures annexes veillant au bon fonctionnement de l'équipement ont été mises en place. Il s'agit d'un paramètre différent de la notion de protection, car il ne caractérise pas une mesure physique mais plutôt organisationnelle.

Entretien :

Cette notion diffère là encore de la précédente, car elle se réfère bien plus à des politiques de maintenance active, de remplacements d'éléments défectueux qu'à plans de gestion préventifs visant à l'assurance du bon fonctionnement de l'équipement sur le long-terme.

2.2.2.3 Autres paramètres spécifiques des équipements

Outre ces notions de protection, d'entretien ou encore de contrôle, il est possible d'identifier d'autres paramètres symptomatiques de l'ampleur des conséquences :

Âge de l'équipement :

C'est un facteur qui peut peser lourd en termes de gravité des conséquences. En effet, tous les équipements possèdent une durée de vie moyenne (DDVM) spécifique, au-delà de laquelle ils sont plus à même de subir des défaillances. De plus, de telles défaillances sont à même de gagner en sévérité avec le temps. Un indice basé sur l'âge relatif d'un équipement par rapport à sa DDVM permettra ainsi de caractériser de manière globale cette donnée pour n'importe quel type d'équipements.

État de l'équipement :

L'influence de ce paramètre peut être considérée comme similaire à celle de l'âge. Ainsi, si l'état d'un matériel donné s'avère être particulièrement dégradé, il sera alors bien plus à même de subir des dysfonctionnements, voire des pannes. La nature et l'importance de tels dommages peuvent être caractérisées par un indice relatif basé sur l'état de l'équipement par rapport à celui qu'il avait lors de son installation. Il convient de noter qu'un tel indice est considéré non pas comme dépendant du temps (il diffère de celui d'âge), mais plutôt des conditions d'utilisation. Il sera possible de lui faire prendre la forme d'une échelle relative à plusieurs niveaux d'état.

Emplacement :

La nature de l'emplacement joue un rôle primordial, en ce sens que le fait que l'équipement soit au sol, en l'air ou enterré modifie complètement la nature des dommages qu'il pourrait être à même de subir en cas d'évènement climatique. Par exemple, une ligne électrique enterrée est bien plus à l'abri des conséquences de vents violents que sa version aérienne. Il importera donc de prendre en compte ce paramètre dans l'analyse de la vulnérabilité en s'intéressant à la position relative de l'équipement par rapport au niveau du sol.

Besoin de matières premières (MP):

Il est possible, comme cela a été présenté plus haut, que l'équipement considéré nécessite pour remplir sa fonction d'avoir recours à certaines matières premières (MP). Leur importance est capitale dans ce cas-ci car le manque de MP peut soit entraîner des défaillances de l'équipement lui-même, soit des défaillances chez les autres systèmes auxquels il est connecté car il n'aura pu fournir les ressources qui leur sont nécessaires, faute de matières premières. Ce paramètre peut prendre la forme d'un indice binaire indiquant s'il y a ou non besoin de MP pour le fonctionnement de l'équipement.

Densité :

Pour prendre en considération la notion d'interdépendances géographiques évoquée plus haut dans ce mémoire, il faut tenir compte de la densité d'équipements du même type que celui sur lequel se porte l'étude dans un certain voisinage donné. Cette prise en compte peut se faire à l'aide d'un indice basé sur une échelle du nombre d'équipements similaires présents et fonctionnels dans un voisinage d'un kilomètre carré.

Importance pour le gestionnaire :

La place que l'équipement occupe au sein du système essentiel est une donnée d'importance pour la présente étude, car c'est elle qui caractérise sa criticité propre. L'évaluation de cette notion fait intervenir deux critères :

- *l'importance pour le gestionnaire*, qui consiste en une appréciation du seul point de vue du propriétaire ou du gestionnaire de l'équipement de la place que ce dernier occupe au sein du réseau des SE;
- *l'importance propre*, qui se définit comme étant le rôle joué par l'équipement dans la propagation des effets domino en cas de défaillance et de la façon dont il participe à la vulnérabilité globale du réseau auquel il appartient.

Il conviendra de se concentrer dans un premier temps sur la seule importance de l'équipement aux yeux de son gestionnaire. En effet, elle peut être déterminée avec la meilleure précision par le propriétaire de l'équipement, car lui seul possède la connaissance spécifique nécessaire à la compréhension de cette importance et des relations existantes entre équipements fournisseurs d'une même ressource.

Il est ainsi du ressort du gestionnaire de donner une évaluation de l'importance et il est possible de s'en servir comme paramètre d'évaluation des conséquences d'un aléa : si un équipement évalué comme étant de grande importance vient à subir des défaillances, les répercussions seront bien plus importantes pour l'ensemble du SE, voire l'ensemble du réseau des SE.

Une échelle de différentes notes d'importance servira de base à l'évaluation de cet indice, qui pourra être par la suite enrichies par des considérations supplémentaires découlant sur les effets domino et la propagation des défaillances.

Les échelles employées pour évaluer ces différents paramètres seront également toutes définies dans l'annexe 3, qui constitue un récapitulatif des différentes valeurs pouvant être prises par les indices définis plus haut et de la signification de chacune d'entre elles. Les tableaux 2-5 et 2-6 donnent des exemples d'échelles pouvant être employées pour évaluer les paramètres « État de l'équipement » et « Entretien »:

Tableau 2-5 : Échelle d'évaluation du paramètre "État de l'équipement"

ÉTAT DE L'ÉQUIPEMENT		
<i>Intact</i>	1	L'équipement présente une durabilité comprise entre 100% et 80% de celle d'origine
<i>Abimé</i>	2	L'équipement présente une durabilité comprise entre 80% et 60% de celle d'origine
<i>Endommagé</i>	3	L'équipement présente une durabilité comprise entre 60% et 40% de celle d'origine
<i>Défectueux</i>	4	L'équipement présente une durabilité comprise entre 40% et 20% de celle d'origine
<i>Ruiné</i>	5	L'équipement présente une durabilité inférieure à 20% de celle d'origine

Tableau 2-6 : Échelle d'évaluation du paramètre "Entretien"

ENTRETIEN		
<i>Non entretenu</i>	0	L'équipement ne possède aucune procédure de maintenance ou d'entretien
<i>Entretenu</i>	1	L'équipement possède un ensemble de procédures de maintenance ou d'entretien

2.2.3 Caractéristiques des municipalités et des régions

Il reste à présent à caractériser les paramètres communs à n'importe quelle région, voire n'importe quelle Municipalité Régionale de Comté (MRC) et qui serviront à l'évaluation de la vulnérabilité. Ces caractéristiques devront être avant tout symptomatiques de l'influence de la géographie dudit territoire sur la vulnérabilité d'un équipement donné.

Pour l'étude à mener, il apparaît que ces paramètres géographiques sont :

Proximité de littoraux :

Par ce paramètre on entend de définir si l'équipement se trouve à proximité ou non de zones côtières. Ces dernières sont en effet propices à la manifestation de certains aléas climatiques, comme des ondes de tempêtes ou des hausses du niveau de la mer, augmentant ainsi l'exposition de toute infrastructure dans ces espaces à des conséquences négatives.

Proximité de cours / points d'eau :

De façon analogique au précédent paramètre sur les littoraux, celui-ci caractérise la présence ou non de l'équipement dans une zone dans laquelle il sera plus exposé à des impacts négatifs consécutifs à la manifestation de différents aléas, comme par exemple des inondations.

Relief :

Ce paramètre important consiste en une évaluation topographique de la position que l'équipement occupe sur le territoire. Il joue un rôle dans l'évaluation de l'importance des conséquences qu'il peut être à même de subir en cas de manifestation d'un aléa climatique. Par exemple en cas d'inondation, les équipements positionnés sur des hauteurs seront moins à même d'être touchés. Pour caractériser cela, il convient de définir une notion de niveaux d'altitude par rapport au niveau de la mer, qui permettra d'évaluer la côte topographique de l'équipement.

Provenance des matières premières (MP) :

En lien avec le besoin en MP d'un équipement, ce paramètre caractérise si ces ressources particulières sont disponibles ou non sur le territoire considéré. L'absence de MP sur le territoire peut en effet se révéler un facteur handicapant pour un équipement dont le fonctionnement est perturbé par un aléa, car cela induit un délai et donc une augmentation du risque de défaillance.

Zone d'importance :

Ce dernier paramètre est similaire à celui de l'importance de l'équipement aux yeux de son gestionnaire, et correspond à l'appartenance ou non de l'équipement à une zone de grande valeur stratégique pour le territoire (un grand parc industriel par exemple). Cette propriété est également liée à la notion de conséquences, à savoir que les répercussions d'une défaillance d'un équipement dans une zone d'importance entraînera de plus grandes conséquences pour les systèmes présents sur le territoire.

2.3 Élaboration de la base de faits

Comme cela a été annoncé plus haut, le principe de la méthodologie développée ici se base sur les concepts et les principes des systèmes experts. Le but sera maintenant d'organiser les paramètres qui ont été précédemment identifiés dans une base de faits. Cette base aura pour fonction de dresser un portrait représentatif de chaque équipement à partir duquel il sera possible de travailler pour en déduire l'évaluation de sa vulnérabilité face aux changements climatiques.

Les équipements implantés sur les territoires de différentes MRC étant généralement de nature identique, la base aura ainsi pour vocation d'être applicable à toutes les municipalités, les différences intervenant uniquement au niveau des paramètres spécifiques aux équipements seuls (comme les paramètres « Âge » et « État » par exemple).

La vulnérabilité est, selon la définition qui a été choisie pour cette étude, une combinaison de la sensibilité et de la criticité de l'équipement. La sensibilité caractérise ici l'exposition d'un élément donné à certains événements climatiques, tandis que la criticité relève d'une mesure de l'importance de la place qu'occupe ce même élément au sein de son réseau.

L'évaluation de la vulnérabilité devra ainsi se baser sur une évaluation de chacune de ces caractéristiques, et c'est dans ce sens que doit être conçue la base de faits. Que ce soit en termes de sensibilité ou de criticité, il convient de distinguer deux types d'évaluation différents :

- *L'évaluation de base* qui consiste en l'ensemble des paramètres qui permettent d'établir les valeurs de sensibilité ou de criticité au moyen de différents jeux de combinaisons et d'interactions multiples;
- *Les aggravateurs* qui sont les paramètres dont les seules valeurs modifient directement celles de criticité ou de sensibilité établies après la caractérisation de base.

Outre ces deux types d'évaluations, il est également possible de regrouper ces paramètres selon trois grandes caractérisations :

- caractérisation des équipements;
- caractérisation de la géographie;
- caractérisation des aléas climatiques.

A partir de ces divers éléments, il devient possible de concevoir la base de faits en classant les paramètres en fonction des trois grandes caractérisations identifiées. Au sein de ces caractérisations les paramètres seront ainsi regroupés selon s'ils servent à une évaluation de base de la sensibilité ou de la criticité, ou bien s'ils en sont des aggravateurs. Le tableau suivant représente la base de faits dans son ensemble :

Tableau 2-7 : Base de faits

ÉQUIPEMENTS	GÉOGRAPHIE	ALÉAS CLIMATIQUES
SENSIBILITÉ DE BASE		
Couple énergie actionneur Protection - Humidité Protection - Température Protection - Niveau eau Protection - Actions mécaniques Mesures spécifiques	Proximité littoraux Proximité cours/points eau	Humidité Température Niveau d'eau Actions mécaniques
AGGRAVATEURS DE SENSIBILITÉ		
État Âge Emplacement Entretien	Relief	Durée évènement
CRITICITÉ DE BASE		
Importance pour gestionnaire Besoin MP	Provenance MP	Diminution MP
AGGRAVATEURS DE CRITICITÉ		
Densité	Zone importance	

La base de faits ainsi construite permettra, une fois les valeurs des paramètres renseignés selon l'équipement étudié, d'obtenir une description précise des propriétés de l'équipement, du milieu dans lequel il est implanté et de la nature des conséquences qu'il peut subir en cas d'aléas climatiques.

Une fois ce portrait dressé, l'évaluation de la sensibilité (ou plutôt des sensibilités aux différents facteurs climatiques) et de la criticité de l'équipement (et donc de sa vulnérabilité) passe par l'application de règles liant les éléments de la base de faits, ce qui est l'objectif du point suivant.

2.4 Élaboration de la base de règles

Dans cette méthodologie d'évaluation de la vulnérabilité, tout comme dans un système expert, la base de règle occupe une place stratégique, car c'est elle qui renferme toute la logique nécessaire à l'établissement des liens entre les paramètres et les éléments de la base de faits. De l'application de ces règles va découler tout un raisonnement qui va aboutir à la caractérisation de la vulnérabilité face aux conséquences des changements climatiques.

Pour chacune des cinq grandeurs caractéristiques de la méthodologie il appartient à présent de définir les relations liant tous ces paramètres entre eux. Le but de la présente section est de présenter le raisonnement global pour chaque grand type de règles, sans devoir les détailler toutes une par une, et ce par souci de clarté. Le détail des règles peut être trouvé à l'annexe 5 du présent mémoire. D'une manière générale, l'élaboration de la base de règles est fondée sur la recherche des interactions entre les paramètres de la base de faits qui sont à même de modifier les valeurs de sensibilité et de criticité de l'équipement. Ainsi ces règles traduisent des notions diverses et des relations logiques liant par exemple l'intensité des facteurs climatiques et la conception technologique de l'équipement.

2.4.1 Règles relatives à la sensibilité de base

Ces règles sont destinées à caractériser l'exposition de l'équipement face à différents aléas climatiques. Il sera ainsi tenu compte de l'intensité des différents facteurs climatiques qui ont été identifiés précédemment, mais également de paramètres liés à la conception même de l'équipement (ainsi que la notion de potentiel d'impact) ou encore à son implantation sur le territoire. Les mesures de protection face à des facteurs climatiques seront également prises en compte de manières à ce que leur absence alourdisse la sensibilité. L'annexe 5 regroupe la description de l'ensemble de ces règles.

Le tableau 2-8 montre de façon globale la façon dont les règles de sensibilité (RS) modifient la valeur des différentes sensibilités aux six grands facteurs climatiques (augmentation ou diminution) ainsi que les paramètres employés par ces mêmes règles.

Tableau 2-8 : Règles pour la sensibilité de base

	PARAMÈTRES												EFFETS					
	Couple énergie actionneur	Humidité	Température	Niveau d'eau	Actions mécaniques	Proximité littoraux	Proximité cours points d'eau	Protection humidité	Protection température	Protection niveau d'eau	Protection actions mécaniques	Mesures spécifiques	Sensibilité Humidité	Sensibilité Température	Sensibilité Niveau d'eau	Sensibilité Action mécanique A	Sensibilité Action mécanique B	Sensibilité Action mécanique C
RS1													+					
RS2														+				
RS3															+			
RS4																+	+	+
RS5															+			
RS6															+			
RS7													+	+	+	+	+	+
RS8													+	+	+	+	+	+
RS9													-	-	-	-	-	-

Ici, chaque ligne désigne une des règles de sensibilité et chaque colonne un paramètre caractérisant la sensibilité et pouvant être employé ou non dans l'application de la règle. L'effet sur les différentes sensibilités aux FC se lit ensuite sur la partie droite du tableau. Par exemple, la ligne RS7 indique que cette règle fait intervenir les paramètres de protection relatifs à chacun des FC, et que son application a pour but d'augmenter la sensibilité. Comme le montre l'annexe 5, le résultat va varier selon si l'équipement s'avère protégé ou non à un FC donné : augmentation de sa sensibilité aux FC contre lesquels il n'est pas protégé ou bien aucun effet en cas de présence de protections adéquates.

Pour mieux comprendre la façon dont fonctionne la base de règles, la même règle de sensibilité de base RS7 mentionnée plus haut est présentée ci-dessous :

SI	VALEUR (Protection / Isolation - FC) = 0
ET	VALEUR (Sensibilité - FC) \geq 3
ALORS	VALEUR (Sensibilité - FC) \leftarrow 2

Concrètement cette règle traduit le fait que lorsque l'équipement étudié ne dispose pas d'une protection à un facteur climatique spécifique (VALEUR (Protection / Isolation - FC) nulle), cela augmente sa sensibilité à un tel FC (VALEUR (Sensibilité - FC) incrémentée de 2) si l'intensité de ce dernier excède une certaine valeur (ici si VALEUR (Sensibilité - FC) est supérieure ou égale à 3).

2.4.2 Règles relatives aux aggravateurs de sensibilité

Outre la notion de sensibilité de base aux différents facteurs climatiques, il est important de tenir compte également des éléments pouvant aggraver ces sensibilités. Ces aggravateurs constituent principalement des paramètres secondaires dont la visée est d'influencer directement la valeur des différentes sensibilités, aussi les règles sur les aggravateurs de sensibilité (RAS) suivantes feront souvent appel à un seul paramètre. Il convient de noter que tous les « aggravateurs » n'ont pas forcément pour fonction d'agir de façon négative, certains d'entre eux sont en effet à même de réduire la sensibilité de l'équipement (comme par exemple l'emplacement).

Il convient par ailleurs de remarquer que de tels paramètres peuvent avoir une influence sur la sensibilité au sens global, donc sur l'ensemble des sensibilités aux six facteurs climatiques. Les règles exposées dans le tableau suivant (Tableau 2-9) sont cohérentes avec cette démarche.

La lecture est ici la même que pour le précédent tableau (Tableau 2-8) : la ligne RAS7 indique que cette règle fait intervenir les paramètres « Emplacement », « Relief » et « Niveau d'eau » (ce qui correspond aux cases grisées) et a pour effet d'augmenter la sensibilité à ce dernier facteur climatique spécifique. Ceci est bien conforme avec la lecture qui peut être faite de cette règle décrite dans l'annexe 5.

Tableau 2-9 : Règles pour les aggravateurs de sensibilité

	PARAMETRES									EFFETS					
	État	Âge	Emplacement	Entretien	Dépendance SE unique	Relief	Durée évènement	Niveau d'eau	Action mécanique A	Sensibilité Humidité	Sensibilité Température	Sensibilité Niveau d'eau	Sensibilité Action mécanique A	Sensibilité Action mécanique B	Sensibilité Action mécanique C
RAS1										+	+	+	+	+	+
RAS2										+	+	+	+	+	+
RAS3										+	+	+	+	+	+
RAS4										+	+	+	+	+	+
RAS5										+	+	+	+	+	+
RAS6										+	+	+	+	+	+
RAS7												+			
RAS8													+		
RAS9										+	+	+	+	+	+
RAS10											-				
RAS11													-	-	-

2.4.3 Règles pour l'évaluation de la criticité

Contrairement à la sensibilité, la notion de criticité ne souffre pas du même caractère multiple, cette donnée étant représentative d'une certaine place occupée par l'équipement au sein du réseau.

La toute première évaluation possible de ce facteur d'importance a été établie dans un premier temps comme ne pouvant être donnée que par le gestionnaire de l'équipement lui-même, et c'est ce qui caractérise la première règle de criticité (RC). Par la suite les règles relatives aux aggravateurs de criticité (RAC) comme à la criticité de base ne font qu'augmenter cette valeur d'importance, ce qui est conforme à la nature des paramètres qui servent pour son évaluation. Le tableau 2-10 récapitule ces éléments :

Tableau 2-10 : Règles relatives à la criticité

	PARAMETRES						EFFETS CRITICITÉ
	Note gestionnaire	Besoin MP	Provenance MP	Diminution MP	Densité	Zone d'importance	
RC1							+
RC2							+
RC3							+
RAC1							+
RAC2							+
RAC3							+

Ici, conformément à l'annexe 5, il est possible de voir qu'une combinaison des paramètres « Besoin en MP », « Provenance MP » et « Diminution de MP » par l'intermédiaire de la règle RC3 peut avoir pour effet d'augmenter la criticité de l'équipement selon la valeur de ces paramètres.

2.5 Combinaison des bases et application du raisonnement

A présent que la méthodologie a été établie et que la base de connaissance a été élaborée, il convient de voir quel emploi peut être fait des bases de faits et de règles, le but à l'origine étant de s'inspirer des systèmes experts afin de proposer une évaluation de la vulnérabilité.

La figure 2-2 donne une vision récapitulative de la méthodologie qui a été suivie :

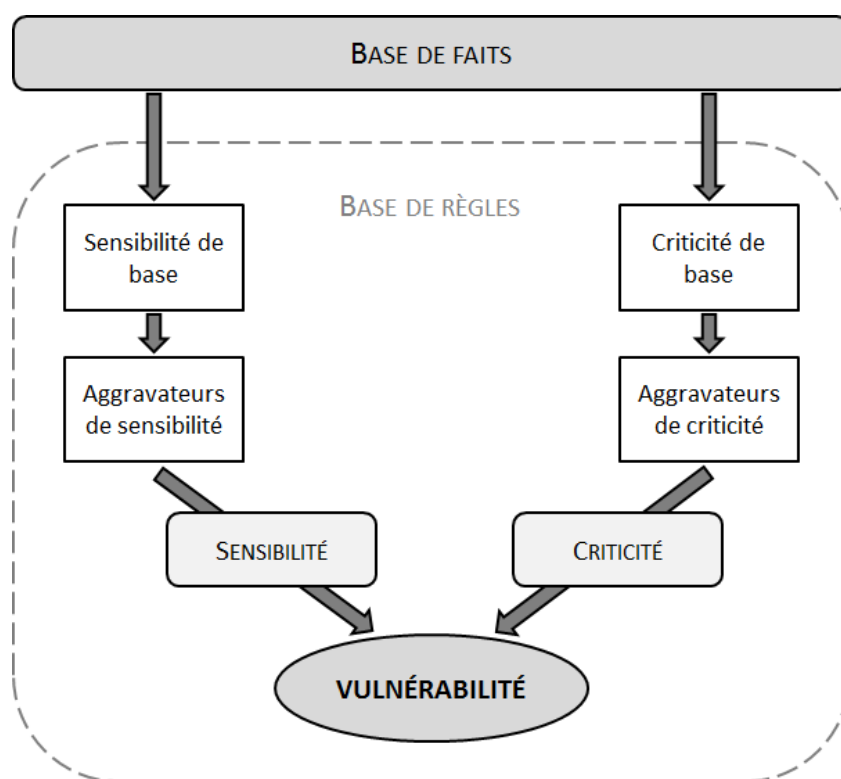


Figure 2-2: Schématisation de la méthodologie

Tout comme pour un système expert, la base de faits qui a été établie renferme pour un équipement donné tout un jeu de paramètres et de constantes caractéristiques de son état et de la façon dont son état peut évoluer sous l'action de divers aléas. Ces données devront être renseignées avant d'appliquer la méthode.

Comme il est possible de le voir sur la figure précédente (Figure 2-2), ces valeurs sont injectées ensuite dans la base de règles, lesquelles règles et servent à caractériser à la fois les différentes sensibilités et la criticité.

En guise de point de départ de la méthode, il y a deux données importantes :

- *Le potentiel d'impact lié à l'actionneur* qui permet de donner une première valeur des différentes sensibilités aux facteurs climatiques si ces derniers sont d'intensité suffisamment importante;
- *L'évaluation de l'importance pour le gestionnaire* qui donne la première estimation de la criticité de l'équipement.

A partir de ces deux paramètres de départ, il convient d'appliquer les différentes règles de façon séquentielle, en commençant par la caractérisation de la sensibilité puis en poursuivant par la criticité. A chaque application d'une des règles il suffit d'aller chercher dans la base de faits les valeurs des paramètres pris en compte dans sa formulation et d'incrémenter ou décrémente en conséquent les valeurs de sensibilité ou de criticité.

La partie suivante de ce mémoire portera justement sur une application suivie de la méthodologie présentée plus haut sur un équipement donné et exposera ainsi les différents résultats qu'il est possible de tirer de cette étude.

CHAPITRE 3 ANALYSE DES RÉSULTATS

Les grandes lignes de la méthode ayant été esquissées dans le chapitre précédent, il appartient désormais de l'appliquer dans le cadre d'une simulation, afin d'en analyser les différents résultats.

3.1 Simulation et premiers résultats pour une MRC-type

3.1.1 Éléments de simulation

La méthode étant destinée à être appliquée aussi bien à l'échelle d'une région qu'au niveau d'une MRC, il convient de s'intéresser à la subdivision la plus élémentaire dans le cadre d'une simulation. De premiers tests de la méthodologie seront ainsi réalisés sur une MRC-type fictive dont les caractéristiques seront prédéterminées et qui comprendra un certain nombre d'équipements également fictifs. Les propriétés de ces différents équipements seront détaillées plus loin dans cette section. Par ailleurs, un certain nombre d'aléas climatiques simulés seront considérés comme ayant des impacts sur cette MRC fictive et ses équipements et il appartiendra de les caractériser dans les diverses simulations. Les différents éléments de cette simulation sont donc :

La MRC fictive :

Afin d'obtenir une représentation la plus proche possible de la réalité, il convenait de s'inspirer d'une MRC déjà existante. Le choix a ainsi été fait de se baser arbitrairement sur la MRC de Joliette, mais uniquement afin de donner une juste représentation de la densité urbaine ainsi que de l'étendue d'un tel territoire.

Le but n'est pas ici de présenter les résultats de l'application de la méthodologie pour le cas spécifique de la MRC de Joliette, mais uniquement de se baser sur les caractéristiques générales de son territoire afin qu'il serve d'étalon pour la méthode. La figure 3-1 présente ainsi une modélisation simplifiée de la MRC-type inspirée de la configuration de celle de Joliette :

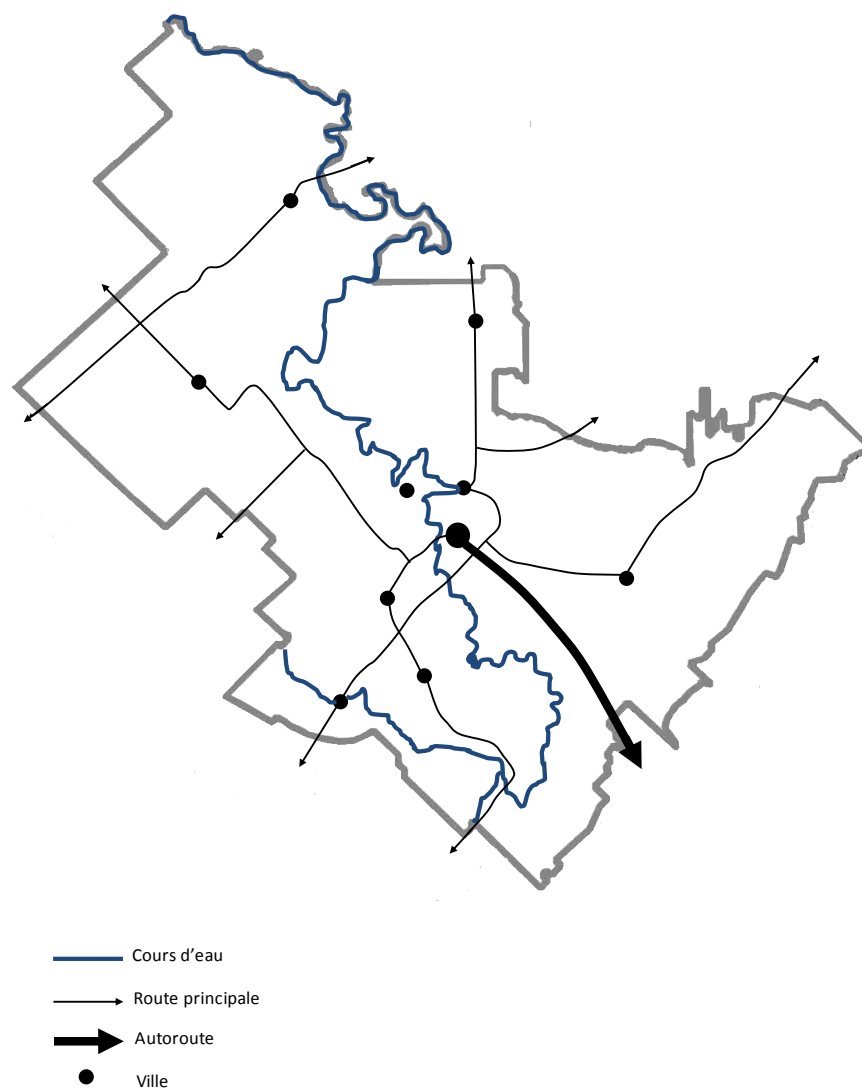


Figure 3-1: Modélisation de la MRC-type

Les équipements :

Pour les différentes simulations le choix a été fait de se limiter à quatre grandes catégories d'équipements considérées comme représentatives des diverses installations et infrastructure propres au territoire d'une MRC. Ces mêmes installations font d'ailleurs partie de l'ensemble des systèmes essentiels nécessaires au bien-être des populations présentes sur le territoire municipal, la liste dressée ici n'ayant pas la vocation d'être exhaustive encore une fois. Les différentes catégories considérées sont donc :

- les équipements de distribution d'électricité;
- les équipements de distribution de gaz;
- les équipements de production d'eau potable;
- les équipements de télécommunications.

En accord avec le Postulat 5, il convient de remarquer que chacun de ces équipements peut être ramené à un système automatisé. Ainsi, toujours par souci de cohérence avec ce même postulat, les infrastructures de transport (routes, voie ferrées, etc...) ne font pas partie des présents éléments de simulation, dans la mesure où elles ne peuvent être représentées par le biais de tels systèmes.

Les aléas :

Chaque territoire n'est pas soumis ou exposé de la même façon aux différents aléas et facteurs climatiques précédemment identifiés. Une solution pourrait être de privilégier l'étude de la vulnérabilité à un aléa donné (une inondation ou une sécheresse par exemple) et de voir l'impact des différents facteurs climatiques associés à cet aléa sur les équipements de la MRC. Cette approche implique une étude par scénarios, or ici l'objectif est de proposer une méthodologie d'évaluation globale de la vulnérabilité, et ce quel que soit l'aléa considéré. Il paraît ainsi plus pertinent de considérer que tous les facteurs climatiques seront sollicités et auront un impact sur les équipements, ce qui revient à considérer que tous les aléas climatiques possibles ont lieu en même temps sur le territoire.

3.1.2 Paramètres de la simulation

A présent que les différents éléments de simulation ont été définis il convient de s'intéresser aux différents paramètres qui leur sont associés et qui serviront à la simulation d'évaluation de la vulnérabilité.

Comme cela a été montré plus haut, le choix a été fait de se concentrer sur certaines grandes catégories d'équipements représentatives du panel de systèmes essentiels du territoire d'une MRC. Les équipements de chacune de ces catégories qui feront partie de la simulation sont présentés dans le tableau 3-1 :

Tableau 3-1 : Identification et classification des équipements

ÉLECTRICITÉ	GAZ	EAU POTABLE	TÉLÉCOMMUNICATIONS
<i>Poste 315 kV : E1</i> <i>Postes 120 kV : E2, E3, E4, E5, E6</i>	<i>Poste de livraison : G1</i> <i>Postes de détente : G2, G3, G4, G5</i>	<i>Usines d'eau potable : H1, H2</i>	<i>Antennes-relais : T1, T2, T3, T4</i>

A chacun de ces dix-sept équipements sont associées différentes caractéristiques qui ont été préalablement définies dans la section précédente de ce mémoire et dont les valeurs possibles sont consignées dans l'annexe 1. Le tableau 3-2 donne un exemple de jeu de paramètres pour un équipement donné qui vont permettre l'évaluation de sa vulnérabilité aux différents FC :

Tableau 3-2 : Exemple de paramètres pour un équipement fictif

SENSIBILITÉ DE BASE					
Couple énergie actionneur	MH	Proximité cours / points d'eau	1	Humidité	4
Protection - Humidité	0	Proximité littoraux	0	Température	4
Protection - Température	0			Niveau d'eau	4
Protection - NE	0			Actions mécaniques	4
Protection - AM	1				
Mesures spécifiques	1				
AGGRAVATEURS DE SENSIBILITÉ					
État	3	Relief	0	Durée évènement	2
Âge	4				
Emplacement	1				
Entretien	1				
Dépendance SE unique	0				
CRITICITÉ DE BASE					
Note gestionnaire	5	Provenance MP	0	Diminution MP	1
Besoin MP	1				
AGGRAVATEURS DE CRITICITÉ					
Densité	4	Zone d'importance	1		

Pour les besoins de la simulation les valeurs pour chacun de ces paramètres ont toutes été posées afin de couvrir le spectre de situations le plus large possible. Le but est que la simulation soit la plus proche possible de la réalité en considérant des équipements aux propriétés très variées, par exemple en s'assurant que la plupart d'entre eux soient d'états, d'âges ou encore de types différents. Il est ainsi possible de cette manière de se rapprocher des conditions d'une municipalité réelle qui possède une grande variété d'infrastructures qui ne sont pas en fonctionnement depuis la même période, ne sont pas gérés de façons identiques, etc...

L'ensemble des paramètres posés pour chaque équipement de la MRC-type est rappelé dans les annexes 6 à 22 pour plus de lisibilité. Le choix a été fait également de regrouper pour chacun d'entre eux l'ensemble des caractéristiques, qu'elles concernent l'équipement lui-même, le territoire ou encore les aléas, et ce afin de disposer de l'ensemble des informations pour l'application des différentes règles.

Afin de respecter la condition imposée plus haut de faire en sorte que tous les dix-sept équipements choisis soient soumis exactement à l'ensemble des aléas climatiques possibles, la valeur de chaque facteur climatique a ainsi été fixée à la valeur nominale de 4. Le choix de cette valeur a été fait pour que l'impact de ces aléas sur les équipements soit suffisamment significatif pour être pris en compte dans l'évaluation de la vulnérabilité, comme il est possible de le voir dans la base de règles (Annexe 5). Par ailleurs cela permet d'avoir une sensibilité de base de l'équipement non nulle.

Il est important de préciser que certaines valeurs sont dépendantes de la position de l'équipement sur le territoire de la municipalité, comme le relief ou encore la présence de cours et de points d'eau à proximité. Là encore, tout comme pour les paramètres spécifiques à l'infrastructure seule, il a été choisi de disposer d'une multitude de configurations d'implantations diverses, afin d'être le plus représentatif possible d'une situation réelle.

Certaines infrastructures particulières ont toutefois un emplacement obligatoire à proximité d'une source d'eau, à savoir les usines d'eau potable. Les autres équipements ont été répartis de la manière décrite dans la figure 3-2 :

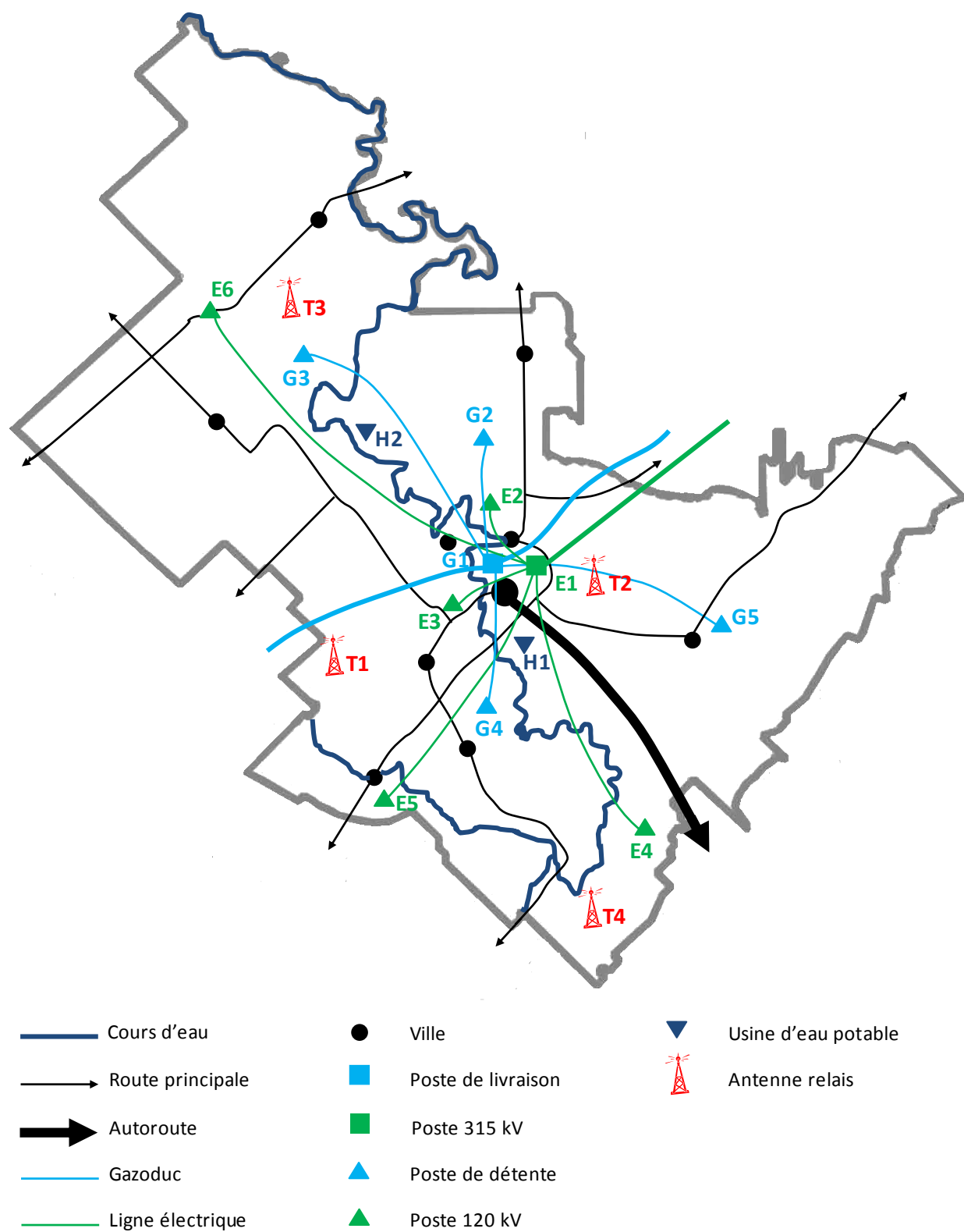


Figure 3-2 : Implantation des équipements sur le territoire de la MRC-type

A présent que les valeurs de tous les paramètres pour l'ensemble des équipements de la MRC sont connues, la base de faits pour la méthodologie est considérée comme étant remplie et il convient à présent d'appliquer la base de règles qui a été définie ultérieurement.

3.1.3 Premiers résultats

L'application de la méthodologie permet de donner pour chacun des dix-sept équipements la valeur de sa sensibilité aux différents facteurs climatiques. Dans l'ensemble des simulations il a été constaté qu'aucun équipement ne dépassait la valeur de 20 dans une ou plusieurs vulnérabilités, aussi cette valeur a été prise comme borne maximale arbitraire, la borne minimale étant la sensibilité de base déterminée par l'annexe 2. Il convient toutefois de noter qu'avec des jeux de données différents cette valeur aurait très bien pu être atteinte, auquel cas il aurait fallu changer de valeur maximale.

3.1.3.1 Vulnérabilité des équipements électriques

La figure 3-3 donne les valeurs des vulnérabilités atteintes pour les différents équipements électriques considérés :

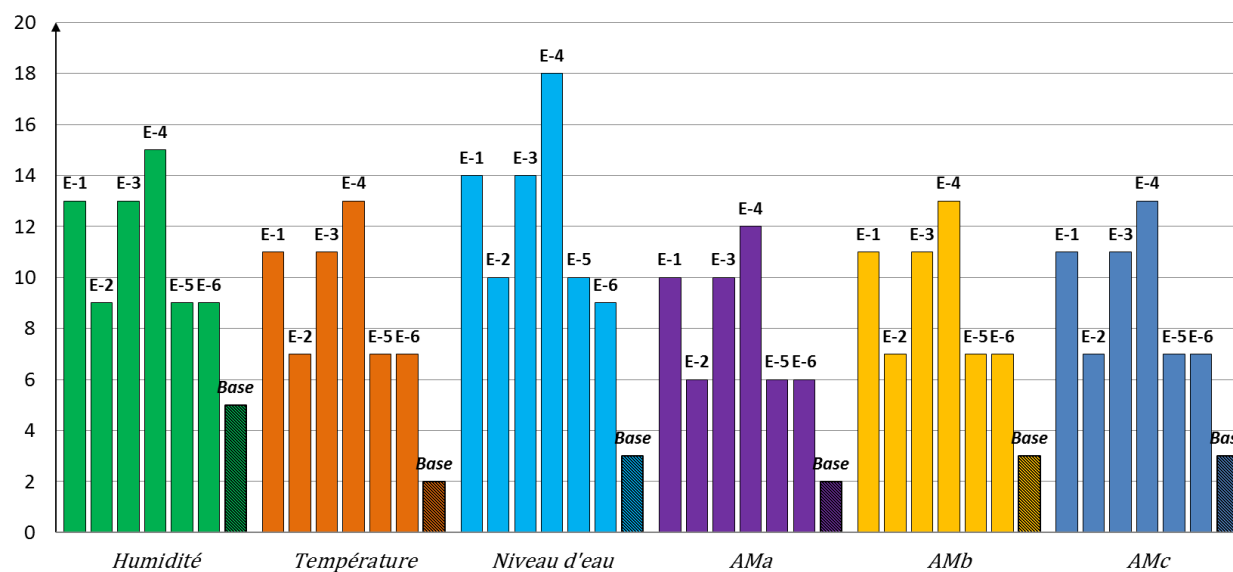


Figure 3-3 : Vulnérabilité des équipements électriques aux différents FC

Bien que tous aient une même sensibilité de base à chacun des FC, il convient de remarquer que la valeur de vulnérabilité finale à chaque FC atteinte peut être six fois plus importante que sa valeur de base dans le cas des équipements les plus sensibles à l'augmentation du niveau d'eau de la MRC, par exemple pour l'équipement E4. Les valeurs de vulnérabilité sont par ailleurs les plus élevées face à l'humidité et au niveau d'eau, ce qui est cohérent avec le fait qu'il s'agisse d'une caractéristique bien connue des systèmes électriques et électroniques. Par ailleurs, il est possible de constater que certains équipements ont des résultats identiques en terme de vulnérabilité bien qu'étant de caractéristiques très différentes, comme les équipements E1 et E3, l'un étant un poste de distribution principal et l'autre un poste secondaire.

Cela est dû aux différentes combinaisons de paramètres qui font que dans certaines règles leurs configurations se balancent et les valeurs finales de sensibilité et de criticité finissent par s'équilibrer, constat qui pourra être fait par la suite pour tous les autres types d'équipements. Enfin, l'équipement E4 semble se distinguer particulièrement par une vulnérabilité plus importante que tous les autres équipements, et ce quel que soit le FC considéré.

3.1.3.2 Vulnérabilité des équipements de gaz

Dans la figure 3-4 sont présentés les résultats pour les équipements de distribution de gaz :

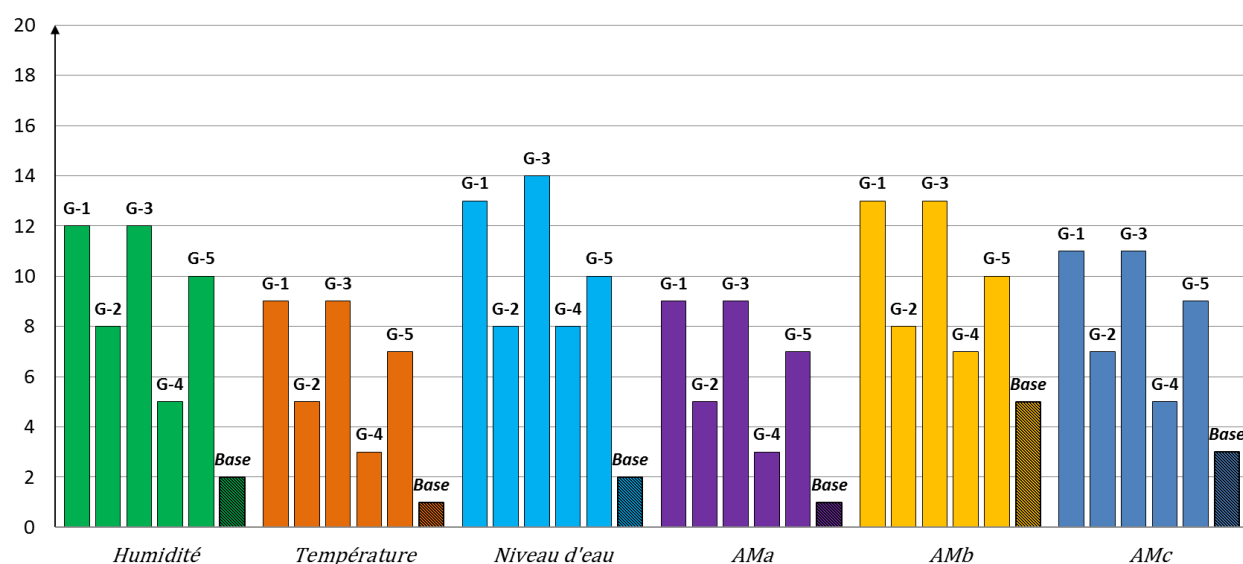


Figure 3-4 : Vulnérabilité des équipements de gaz aux différents FC

Pour cette catégorie d'équipements, le constat principal qui peut être fait est qu'il n'y a pas un équipement en particulier qui se détache des autres en termes de vulnérabilité à un ou plusieurs FC. Il convient néanmoins de constater que les vulnérabilités à certains FC peuvent être jusqu'à sept fois plus importantes que leur valeur de base pour certains équipements (G3 par exemple). Les valeurs de vulnérabilité atteintes sont par ailleurs bien moins élevées que pour ce type d'équipements que pour les équipements électriques, ce qui peut être symptomatique d'une certaine résistance face aux différents FC considérés. Cette considération est toutefois à nuancer avec le fait que les valeurs de sensibilité de base sont données arbitrairement et doivent faire l'objet d'études spécifiques.

3.1.3.3 Vulnérabilité des équipements hydrauliques

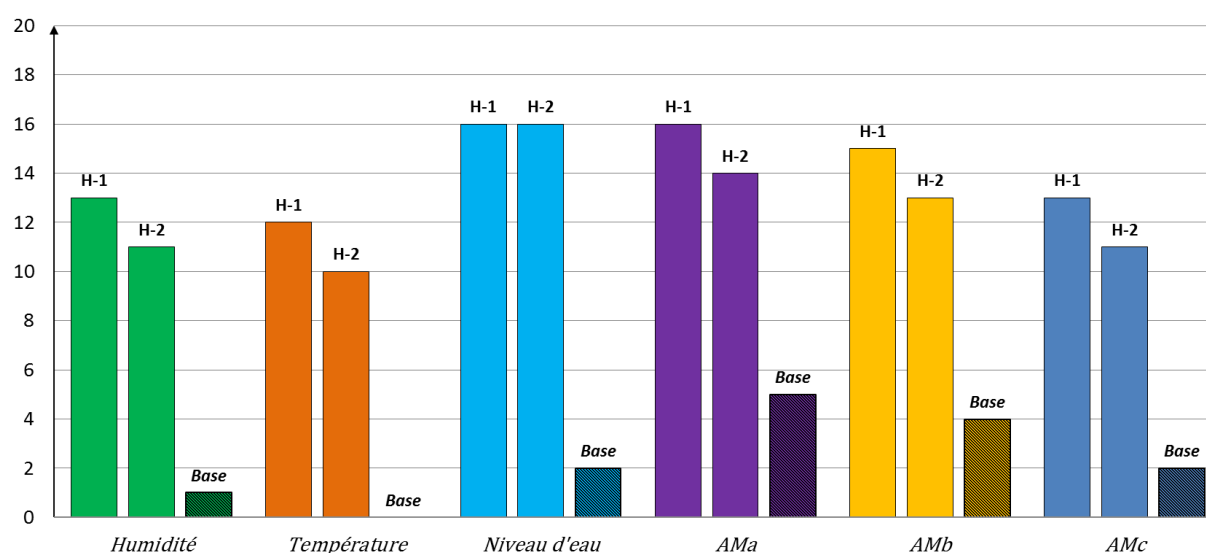


Figure 3-5 : Vulnérabilité des équipements hydrauliques aux différents FC

Pour cette catégorie, il est intéressant de remarquer que bien qu'il n'y ait pas de sensibilité de base à la température pour ces équipements, ils n'en demeurent pas moins vulnérables de par leur implantation et la façon dont ils peuvent être affectés par les impacts indirects de ce FC. Les deux équipements considérés semblent par ailleurs similaires en terme de vulnérabilité aux divers FC.

3.1.3.4 Vulnérabilité des équipements de télécommunications

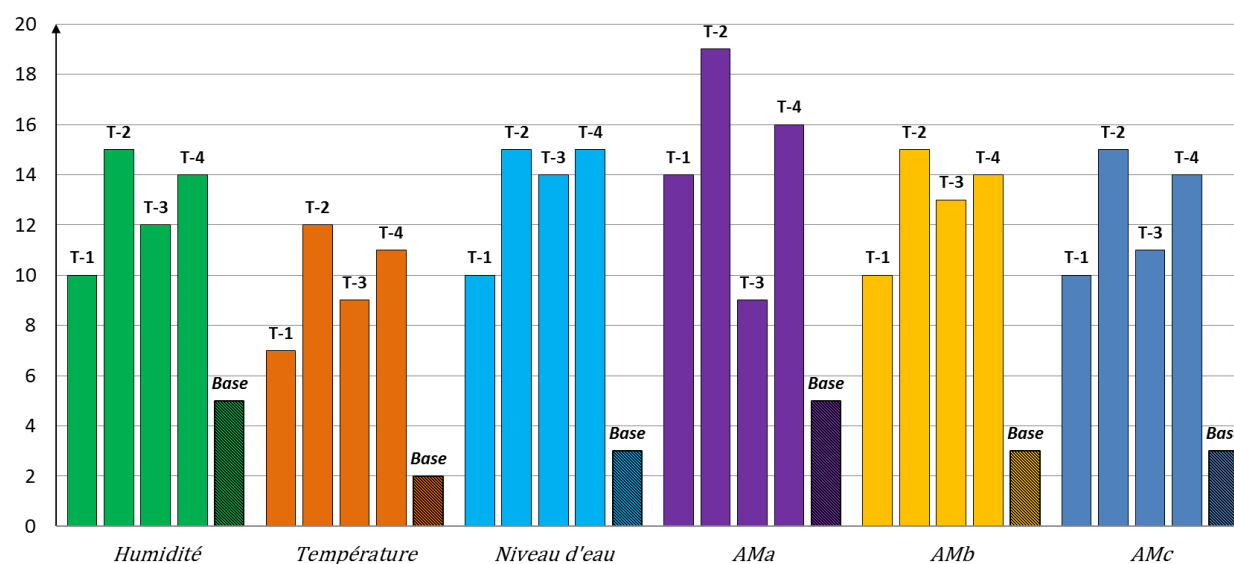


Figure 3-6 : Vulnérabilité des équipements télécoms aux différents FC

Il convient ici de constater la grande diversité de résultats pour les études de vulnérabilités sur ces équipements (Figure 3-6). Bien qu'il s'avère possible que certains équipements de même type mais aux propriétés différentes finissent par avoir les mêmes valeurs de vulnérabilité, ce n'est visiblement pas le cas pour les systèmes de télécommunications, sans doute encore une fois car le jeu de paramètres implémenté ne le permet pas.

Par ailleurs, de façon analogue à ce qui avait pu être observé dans le cas des infrastructures électriques, il est possible de distinguer un équipement qui se distingue particulièrement par sa vulnérabilité à un facteur climatique spécifique, à savoir l'E4. Là encore la valeur de vulnérabilité atteinte peut être très importante en comparaison de celle de la sensibilité de base, ce qui peut être expliquée par l'importance du nombre de conditions aggravatrices de la sensibilité des équipements face aux impacts des aléas climatiques.

Une fois que ces considérations ont été faites pour chaque type d'équipement, il convient de recombinaison ces résultats afin de dresser un profil de vulnérabilité de la MRC face aux différents facteurs climatiques.

3.2 Profils de vulnérabilité

3.2.1 Notions de seuils de vulnérabilité

La notion de profil de vulnérabilité est liée à l'appréciation de la différence entre un équipement considéré comme vulnérable et un qui ne l'est pas. Cette différence peut être caractérisée par une valeur plafond de vulnérabilité qui fait ainsi la limite entre les équipements vulnérables et les autres. Cette limite, fixée pour chaque vulnérabilité à un FC donné, constitue ainsi un seuil de vulnérabilité (SV), et il est ainsi possible de définir six SV.

Les choix portant sur la valeur à donner à chacun de ces SV sont guidés par des politiques de gestion, soit donc des ensembles de procédures et de règles qui servent de canevas aux processus décisionnels cruciaux pour la région ou la MRC. C'est donc à partir de la ligne de conduite adoptée par ces différentes politiques de gestion que vont être déduites les valeurs à donner pour les seuils de vulnérabilité. Il est possible d'en distinguer trois grands types :

- *Les politiques souples* qui se basent sur une plus grande tolérance aux valeurs de vulnérabilités maximales admissibles, et sont donc symptomatiques de SV élevés;
- *Les politiques moyennes* qui constituent une approche modérée de l'appréciation de la vulnérabilité maximale admissible;
- *Les politiques dures*, caractérisée par des SV faibles, qui se retrouvent dans la gestion d'infrastructures à grande importance stratégique et demandent ainsi de faibles valeurs de vulnérabilité maximale.

Le choix de la politique à adopter et donc des seuils à fixer pour les différentes vulnérabilités est donc du ressort des décideurs et des gestionnaires des diverses infrastructures de la municipalité. Un tel choix modifie ainsi le nombre d'équipements concernés par d'éventuelles mesures correctives visant à ramener leurs valeurs de vulnérabilité sous les SV fixés. Il convient ainsi d'étudier l'influence de ces différents choix de politique, en se concentrant sur un facteur climatique en particulier : le niveau d'eau. Une telle démarche pourra être généralisée et ainsi étendue à tous les autres facteurs climatiques.

3.2.2 Influence des seuils de vulnérabilité pour le FC « Niveau d'eau »

Le choix est fait de se concentrer sur la vulnérabilité à ce facteur spécifique, car il est largement représenté dans les divers aléas climatiques considérés pour cette étude. La figure suivante présente les différents résultats obtenus concernant la vulnérabilité des différents équipements de la MRC face au niveau d'eau :

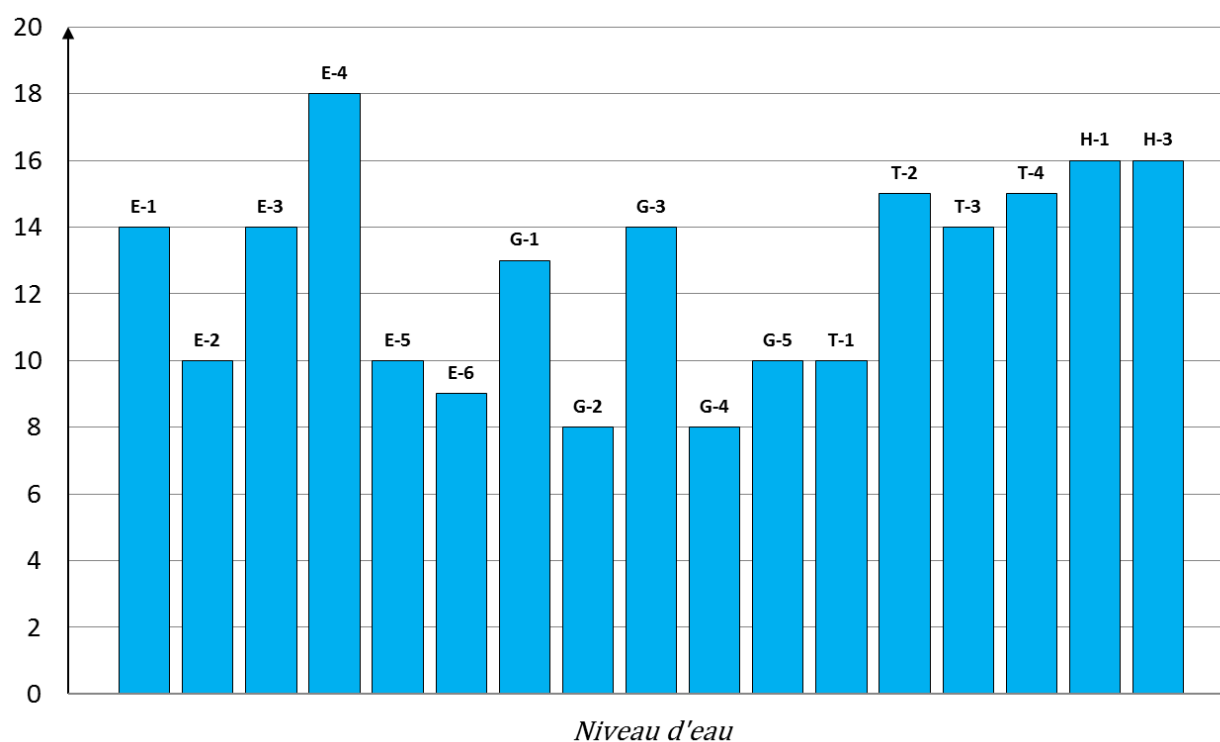


Figure 3-7 : Vulnérabilité des équipements de la MRC au facteur climatique "Niveau d'eau"

Il s'agit ici d'une compilation des précédents chiffres obtenus (Figures 3-3 à 3-6) pour chaque catégorie d'équipements, regroupés ici pour la vulnérabilité à l'humidité seule. À partir de ces résultats, et en accord avec les définitions qui ont été données des différentes politiques de gestion possibles, il convient de définir les divers seuils de vulnérabilité associés. Comme cela a été montré plus haut, la valeur d'un seuil est avant tout un choix des décideurs municipaux et des gestionnaires, valeur qui reflète l'ensemble des actions et des règles de gestion qu'ils ont pour habitude de mettre en place.

Ici, les seuils seront définis à partir de l'ensemble des valeurs de vulnérabilité obtenues pour chaque équipement, en considérant notamment la vulnérabilité maximale atteinte. Cette dernière est de 18 pour l'équipement E4, et la moyenne des résultats calculés est de 12.6. Il est ainsi possible de définir les seuils suivants, qui ne sont ici posés qu'à des fins de démonstration :

- *Le seuil de vulnérabilité au niveau d'eau correspondant à une politique de gestion modérée (SV-NE_m)* qui se basera sur la moyenne des valeurs de vulnérabilité et qui sera ainsi fixé à 13;
- *Le seuil de vulnérabilité associé à une politique dure (SV-NE_d)*, qui concernera les équipements dont la vulnérabilité est supérieure à une valeur intermédiaire entre la plus basse note de vulnérabilité et la note moyenne, valeur qui sera fixée à 10;
- *Le seuil de vulnérabilité caractéristique d'une politique souple (SV-NE_s)* qui consistera en une valeur comprise entre la note moyenne de vulnérabilité et la note maximale, concernant ainsi uniquement les équipements aux vulnérabilités les plus élevées. Cette valeur-seuil sera fixée à 15.

À présent, ces valeurs de seuils vont permettre de caractériser le nombre d'équipements qui sont considérés, selon la politique choisie, comme ayant une vulnérabilité au niveau d'eau non acceptable et qui nécessiteront la mise en place de mesures correctives. Selon les seuils choisis, ce nombre d'équipements concernés sera plus ou moins important.

Cela est conforme avec les impacts des différents types de politique pouvant être choisis par les dirigeants et les gestionnaires. Par exemple, si une politique de gestion dure est mise en place, il apparaît qu'un grand nombre d'équipements retiendront l'attention lors des analyses de vulnérabilité et seront considérés comme autant de points critiques de la MRC. Ce choix peut se justifier par une volonté d'identifier un grand nombre de ces points sensibles, quel que soit le prix des mesures à mettre en place. À l'inverse, le choix d'une politique plus souple permettra de mettre en lumière les plus importants points de vulnérabilité de la MRC, et sera ainsi parfaitement adéquat si la MRC ne cherche qu'à intervenir sur un petit nombre de systèmes.

Les graphiques à venir montre ainsi les impacts du choix d'une politique spécifique sur le nombre d'équipements sur lesquels il faudrait intervenir. La figure suivante montre ainsi le nombre et le type de systèmes concernés pour le $SV-NE_d = 10$ (politique de gestion dure) :

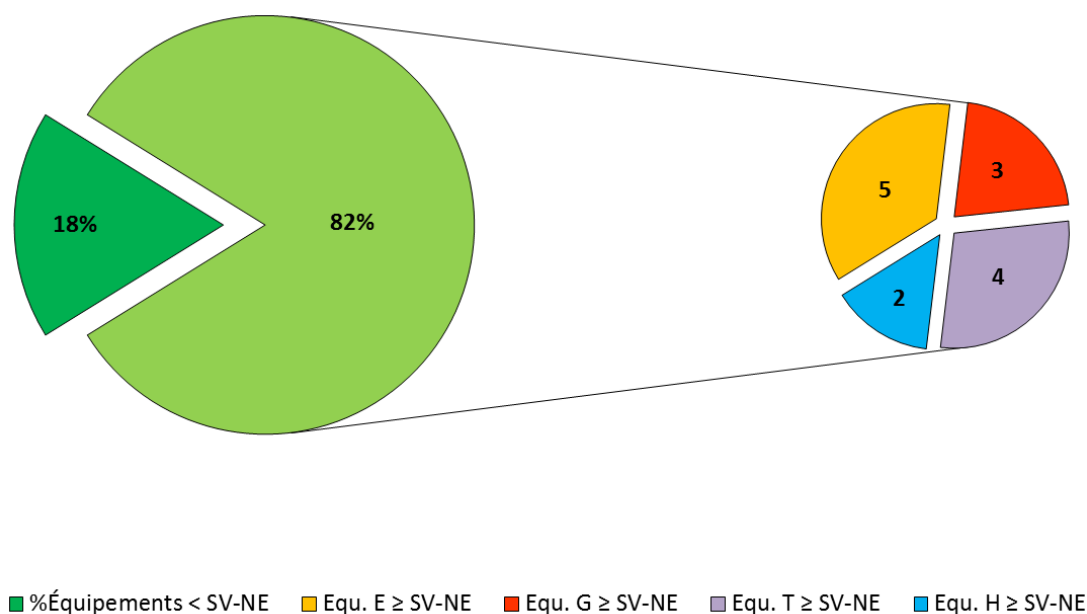


Figure 3-8 : Équipements vulnérables pour une politique dure ($SV-NE = 10$)

La figure montre ainsi que selon les critères spécifiques de cette politique de gestion, une grande majorité d'équipements sont considérés comme vulnérables : 14 équipements sur 17 au total de tous types confondus, soit donc 82%. Les résultats montrent également que ce sont les équipements électriques et les équipements de télécommunications qui sont les plus vulnérables à l'augmentation du niveau d'eau. Les premières mesures à prendre dans le cas d'une campagne de réduction de la vulnérabilité à très large spectre devront ainsi viser ces types d'équipements spécifiques.

Il est également possible de donner ainsi une représentation des différents points critiques ainsi identifiés sur une carte de la MRC. Cela permet d'identifier les éventuelles concentrations d'équipements vulnérables qui seront aussi les zones à prioriser pour la mise en place d'actions correctives. La figure suivante établit cette cartographie :

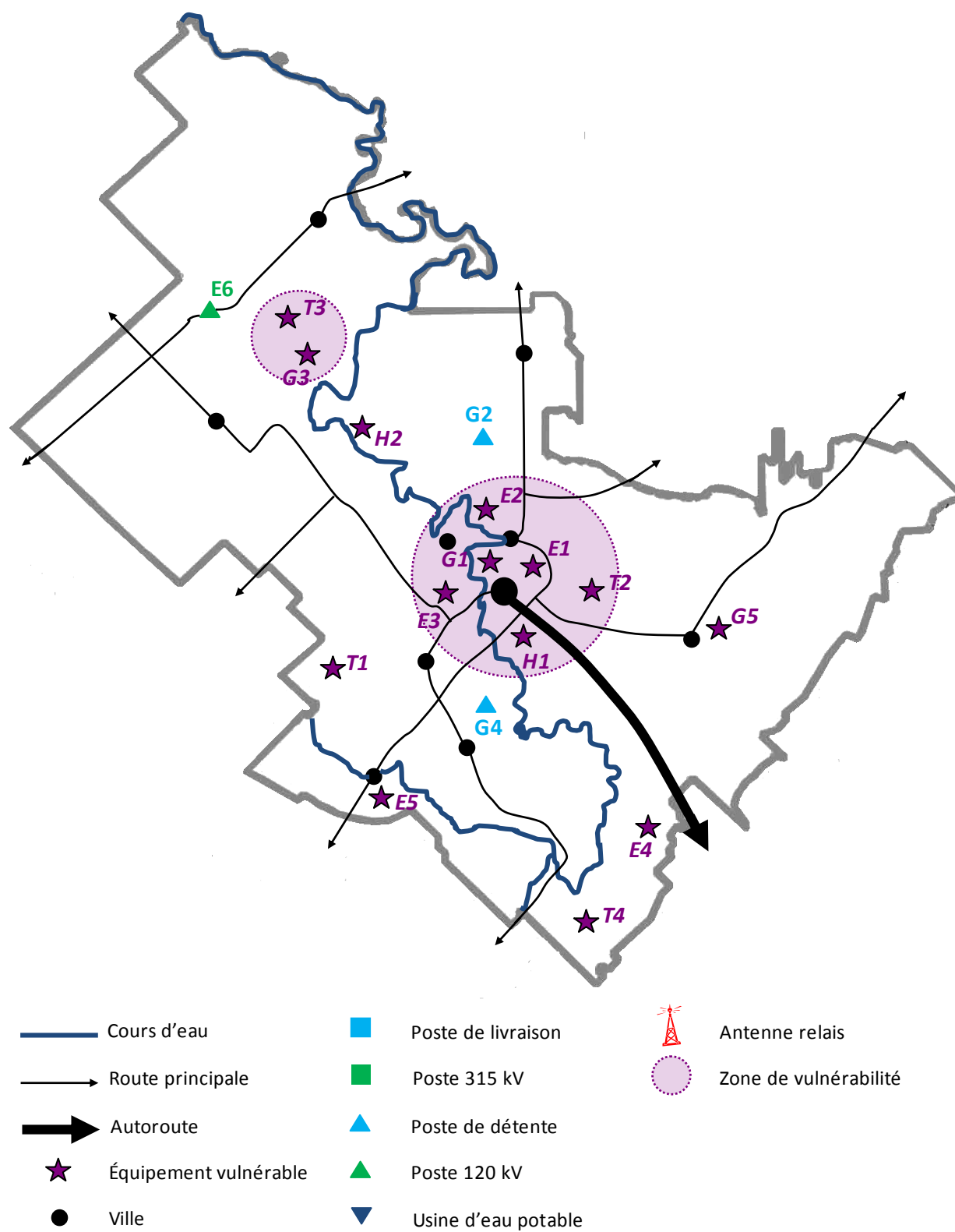


Figure 3-9 : Cartographie de la vulnérabilité de la MRC pour une politique de gestion dure

La concentration de systèmes touchés fait apparaître notamment une grande zone de vulnérabilité au centre de la MRC, au niveau de la ville principale. C'est ici qu'il faudra porter une attention particulière à la nature des dysfonctionnements pouvant résulter de la vulnérabilité des divers équipements qui s'y trouvent. De telles représentations cartographiques permettent ainsi de visualiser de manière directe les points de la MRC nécessitant diverses interventions et potentiellement sources de défaillances pour les systèmes essentiels du territoire.

La figure suivante montre les mêmes résultats, mais cette fois dans le cadre de l'application d'une politique de gestion plus modérée, à savoir donc en considérant que $SV-NE_m = 13$:

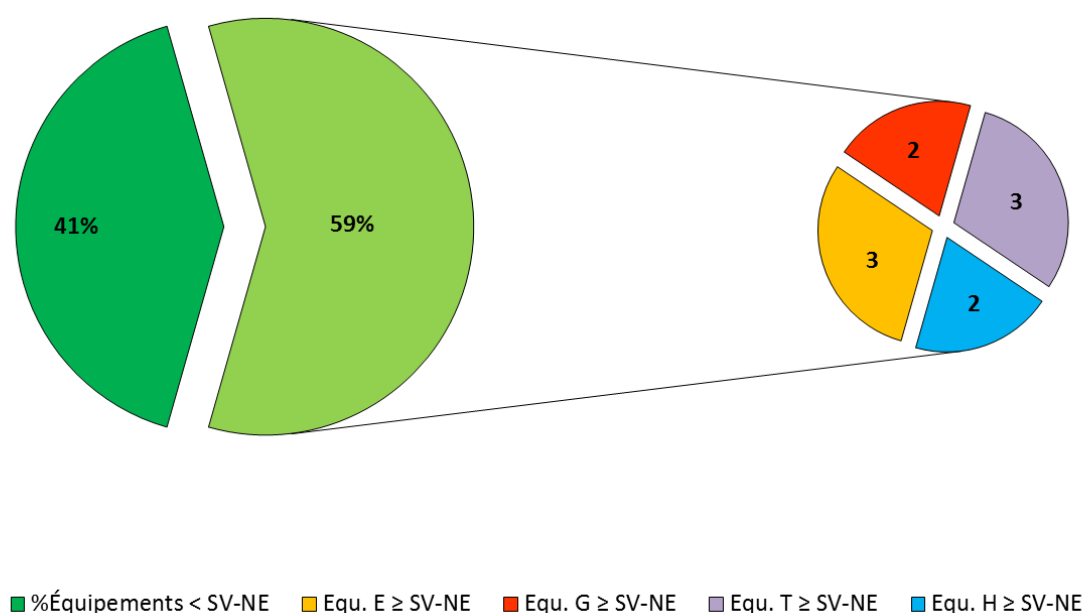


Figure 3-10 : Équipements vulnérables pour une politique modérée ($SV-NE = 13$)

Pour une telle politique, une majorité des infrastructures de la MRC demeurent vulnérables (10 équipements, soit environ 59%), avec encore une fois une prédominance pour les équipements électriques et de télécommunications qui devront faire partie des premiers sur lesquels les gestionnaire devront être en mesure d'intervenir.

La figure suivante présente la façon dont se répartissent ces différents points de vulnérabilité sur le territoire de la MRC :

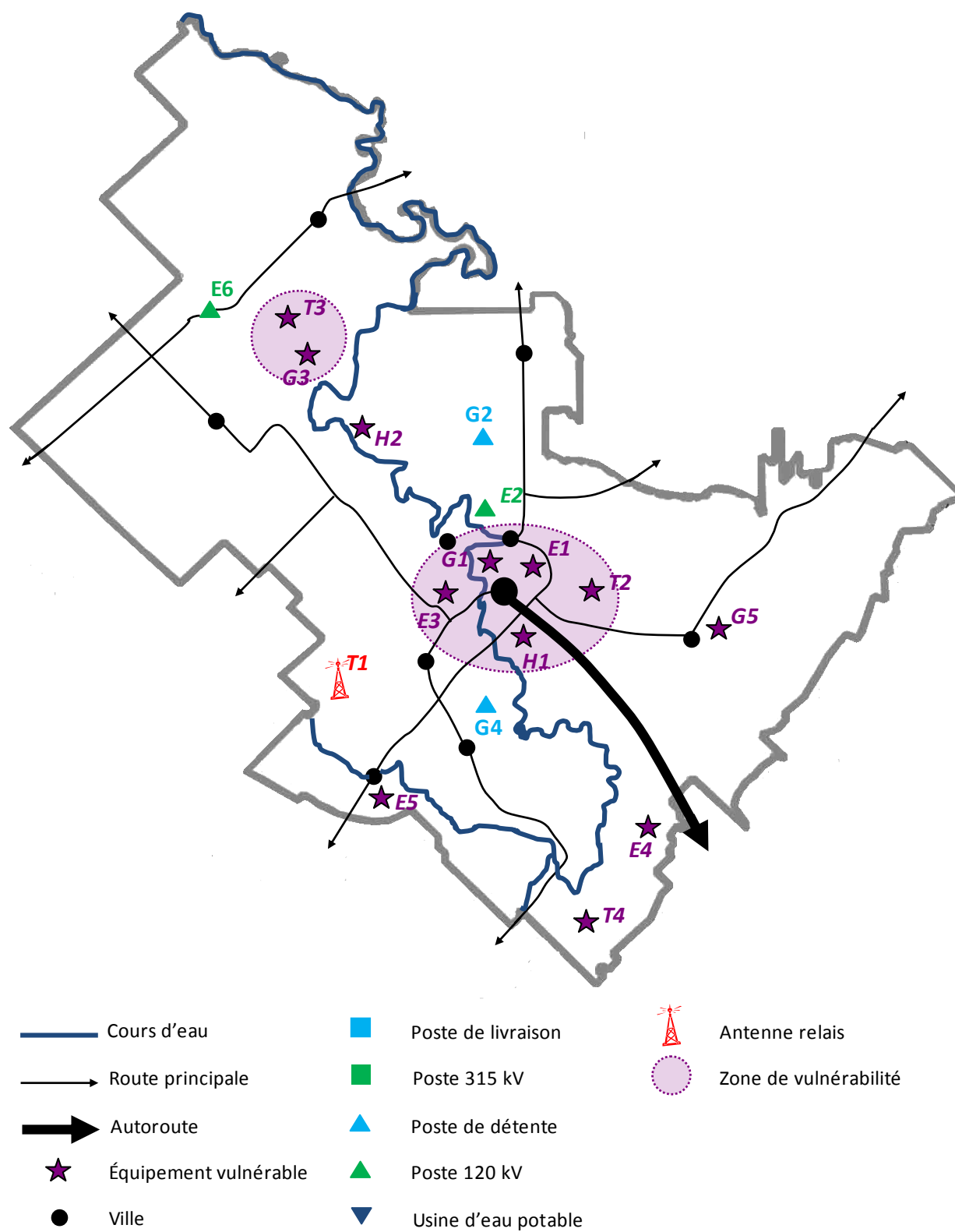


Figure 3-11 : Cartographie de la vulnérabilité de la MRC pour une politique de gestion modérée

Ici encore se dessine une importante zone de vulnérabilité à proximité de la ville principale, bien qu'elle soit moins importante qu'en cas d'application d'une politique plus dure. Cette région spécifique demeure ainsi une zone de grande concentration d'équipements vulnérables et requiert toujours toute l'attention des décideurs. Il demeure également une plus petite zone au Nord-Ouest de la MRC qu'il conviendra de considérer également dans les futures études d'adaptation et de réduction de la vulnérabilité.

En dernier lieu, il convient de s'intéresser au cas de la politique de gestion souple. La figure suivante expose les résultats obtenus lors de la comparaison de la vulnérabilité des équipements à la valeur-seuil $SV-NE_s = 15$:

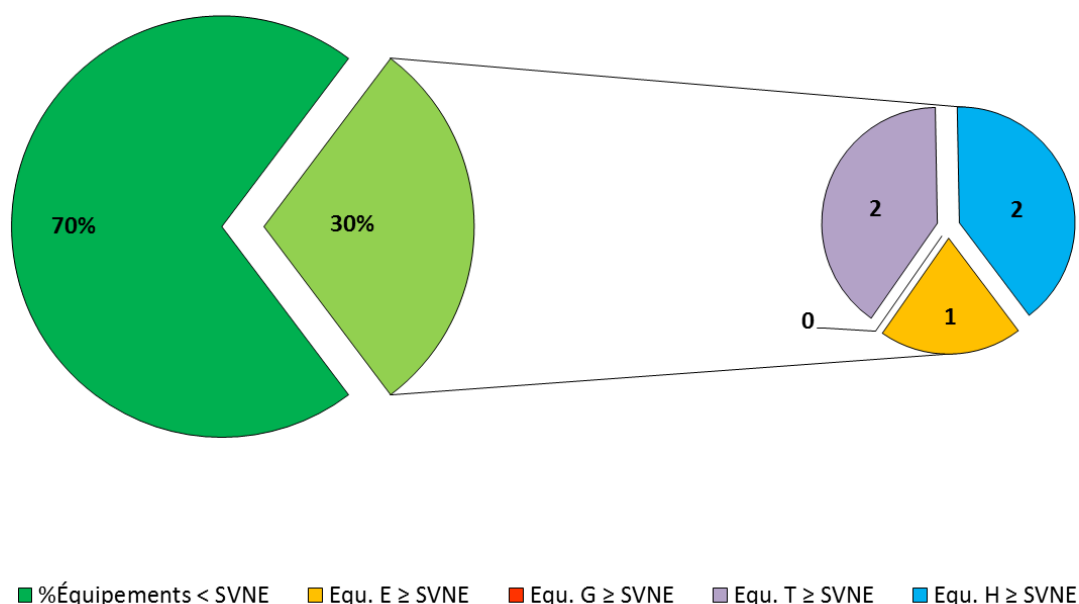


Figure 3-12 : Équipements vulnérables pour une politique modérée ($SV-NE = 15$)

Dans ce dernier cas, le nombre d'équipements concernés par des processus de réduction de la vulnérabilité a considérablement diminué, ayant même été divisé par deux. Par ailleurs la tendance dans les types d'équipements touchés a changé et désormais ce sont les équipements hydrauliques qui font partie des plus vulnérables avec ceux de télécommunications.

La figure suivante donne la distribution géographique de ces équipements considérés comme vulnérables dans le cas de l'application d'une politique souple telle que $SV-NE_s = 15$:

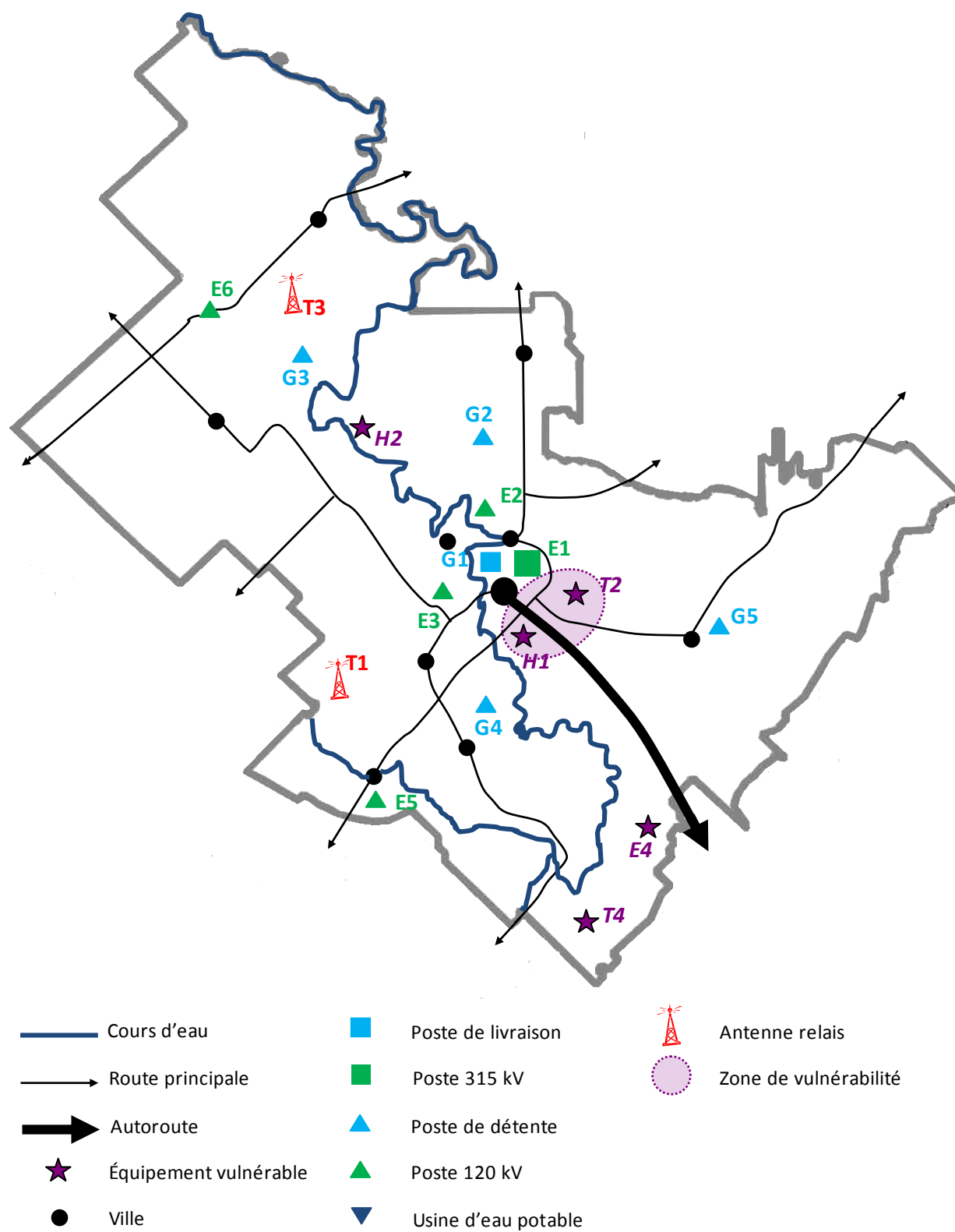


Figure 3-13 : Cartographie de la vulnérabilité de la MRC pour une politique de gestion souple

Même en appliquant une politique plus souple en matière de vulnérabilité, un petit îlot demeure au centre de la MRC, et il conviendra de considérer les deux infrastructures qui en font partie. Une étude à mener serait d'étudier les éventuels impacts sur l'ensemble des autres systèmes essentiels d'une défaillance au sein de cette zone, en s'intéressant par exemple aux effets domino potentiels. Bien entendu, une telle politique permettrait de se concentrer avant tout sur les principaux grands points de vulnérabilité du territoire et il conviendra ainsi de prioriser les actions pour ces équipements qui ont été mis en exergue.

Encore une fois, la portée de ces applications est avant tout purement démonstrative : il s'agissait de montrer les différents niveaux de détail qu'il est possible d'obtenir lors de l'application de la méthode. Avec un choix de seuil de vulnérabilité faible, les zones critiques se font nombreuses, tandis que l'application de règles plus souples permet d'attirer l'attention sur les plus gros problèmes potentiels. Tout dépend de ce que veulent décideurs et gestionnaires et de ce qui correspond le mieux à leurs habitudes de gestion, la méthode leur offre ainsi une grande adaptabilité.

De telles considérations peuvent être appliquées à l'ensemble des autres facteurs climatiques, et les décideurs peuvent très bien fixer une même politique pour l'ensemble des FC, et donc imposer un seuil unique, ou bien choisir de moduler leur politique en fonction de scénarios climatiques et ainsi préférer éprouver la vulnérabilité de leur territoire à certains facteurs particuliers (et donc à certains aléas climatiques).

Il appartient ensuite aux experts des changements climatiques et des systèmes essentiels de se réunir afin de compléter cette approche par des études plus approfondies en matières d'impacts spécifiques, d'interdépendances, ou encore de raffinement des scénarios et des enjeux climatiques propres au territoire de la région ou de la MRC.

La méthode développée permet justement aussi d'anticiper l'évolution du profil de vulnérabilité actuel de la région, en donnant la possibilité d'étudier l'impact de mesures correctives ou encore des changements de conditions de fonctionnement pour un équipement donné. Il est également possible d'intégrer différentes composantes supplémentaires des changements climatiques pour enrichir l'analyse. Ces exemples d'applications spécifiques feront l'objet de la section suivante.

CHAPITRE 4 APPLICATIONS SPÉCIFIQUES ET PERSPECTIVES

Les résultats précédemment obtenus permettent aux décideurs de prioriser les équipements et les infrastructures pour lesquels ils comptent déployer un certain nombre d'actions correctives en vue d'en réduire les vulnérabilités.

Néanmoins, il n'est pas toujours aisé d'anticiper l'impact de telles mesures et ainsi d'estimer si l'équipement a été effectivement ramené à une vulnérabilité acceptable. De même, comment savoir si l'analyse qui a été effectuée aujourd'hui sera toujours valable dans 10, 20, 30 ans ? Et comment est-il possible de prendre en compte les projections climatiques au niveau de la région dans l'analyse actuelle ? C'est à ces questions que se proposent de répondre les analyses spécifiques suivantes basées sur la méthodologie développée dans les sections précédentes.

4.1 Vulnérabilité et mesures correctives

4.1.1 Contexte et paramètres

Dans le cadre de cette étude, le choix a été fait de partir du principe que les décideurs de la MRC se sont accordées sur l'application de la même politique modérée vis-à-vis de tous les aléas climatiques, et ont ainsi décidé de fixer un même seuil de vulnérabilité pour tous les FC. La valeur de ce seuil sera de 13, ce qui est conforme à l'application d'une politique de ce type. En procédant de cette façon il est possible ensuite d'effectuer une sélection parmi un grand nombre d'équipements considérés comme relativement vulnérables de la MRC et de voir comment cette vulnérabilité peut être ramenée à des niveaux tolérables.

Parmi les équipements considérés comme vulnérables avec ce choix de seuil, l'analyse se portera plus spécifiquement sur l'équipement T2, dont les valeurs de vulnérabilités sont quasiment toutes supérieures à la limite fixée. La figure et le tableau suivants rappellent ces différents résultats obtenus ainsi que les paramètres qui ont été posés et qui ont permis d'aboutir à une telle évaluation de la vulnérabilité:

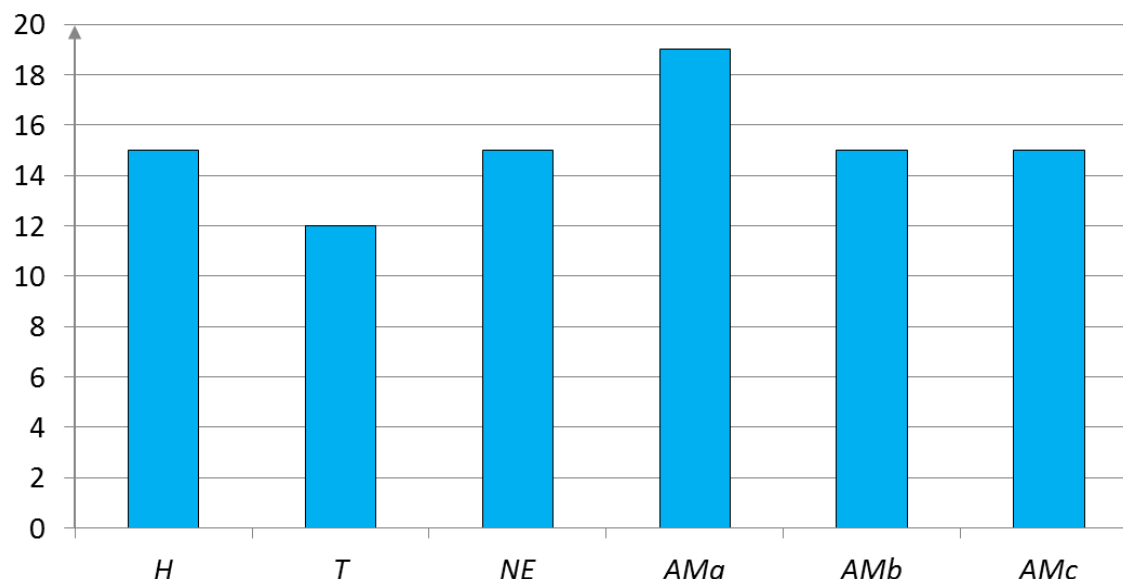


Figure 4-1: Vulnérabilité de l'équipement T2 selon les différents FC

Tableau 4-1 : Paramètres caractéristiques pour l'équipement T2

SENSIBILITÉ DE BASE					
Couple énergie actionneur	EE	Proximité cours / points d'eau	0	Humidité	4
Protection - Humidité	1	Proximité littoraux	0	Température	4
Protection - Température	1			Niveau d'eau	4
Protection - NE	0			Actions mécaniques	4
Protection - AM	0				
Mesures spécifiques	0				
AGGRAVATEURS DE SENSIBILITÉ					
État	2	Relief	1	Durée évènement	2
Âge	4				
Emplacement	3				
Entretien	1				
Dépendance SE unique	0				
CRITICITÉ DE BASE					
Note gestionnaire	5	Provenance MP	0	Diminution MP	1
Besoin MP	0				
AGGRAVATEURS DE CRITICITÉ					
Densité	4	Zone d'importance	1		

4.1.2 Choix des mesures correctives

Il convient ensuite de caractériser les paramètres qui vont être modifiés par l'ajout de mesures spécifiques. Le choix va se porter sur ceux qui sont considérés comme entraînant des augmentations de la valeur de vulnérabilité pour un certain nombre de FC :

- *Protection – NE* : des protections étanches sont ajoutées;
- *Protection – AM* : la structure existante sera renforcée pour mieux résister aux chocs;
- *Mesures spécifiques* : de nouvelles procédures de gestion sont implémentées;
- *Note gestionnaire* : un autre équipement similaire est implanté sur le territoire.

Les répercussions de telles mesures sont présentées dans le tableau suivant :

Tableau 4-2 : Paramètres pour l'équipement T2 après application des mesures

SENSIBILITÉ DE BASE					
Couple énergie actionneur	EE	Proximité cours / points d'eau	0	Humidité	4
Protection - Humidité	1	Proximité littoraux	0	Température	4
Protection - Température	1			Niveau d'eau	4
<i>Protection - NE</i>	<i>1</i>			Actions mécaniques	4
<i>Protection - AM</i>	<i>1</i>				
<i>Mesures spécifiques</i>	<i>1</i>				
AGGRAVATEURS DE SENSIBILITÉ					
État	2	Relief	1	Durée évènement	2
Âge	4				
Emplacement	3				
Entretien	1				
Dépendance SE unique	0				
CRITICITÉ DE BASE					
<i>Note gestionnaire</i>	<i>3</i>	Provenance MP	0	Diminution MP	1
Besoin MP	0				
AGGRAVATEURS DE CRITICITÉ					
Densité	4	Zone d'importance	1		

4.1.3 Nouvelle analyse de vulnérabilité

Les mesures correctives qui ont été prises ont eu des effets directs sur les caractéristiques de l'équipement. Le fait d'ajouter des protections spécifiques qui n'y étaient pas à l'origine rend l'infrastructure bien moins sensible à certains FC. Par ailleurs, en installant un autre équipement qui remplit les mêmes fonctions à proximité, sa valeur stratégique se voit dévaluée, étant donné qu'il ne constitue plus le seul équipement d'importance à remplir un rôle spécifique dans la zone. Du coup, cela diminue la valeur de la note que lui attribue le gestionnaire, et réduit ainsi sa criticité aux yeux du réseau des infrastructures essentielles. A présent, il convient de réinjecter ces nouveaux paramètres dans le modèle et d'appliquer la base de règles. La figure suivante donne ainsi des résultats comparatifs :

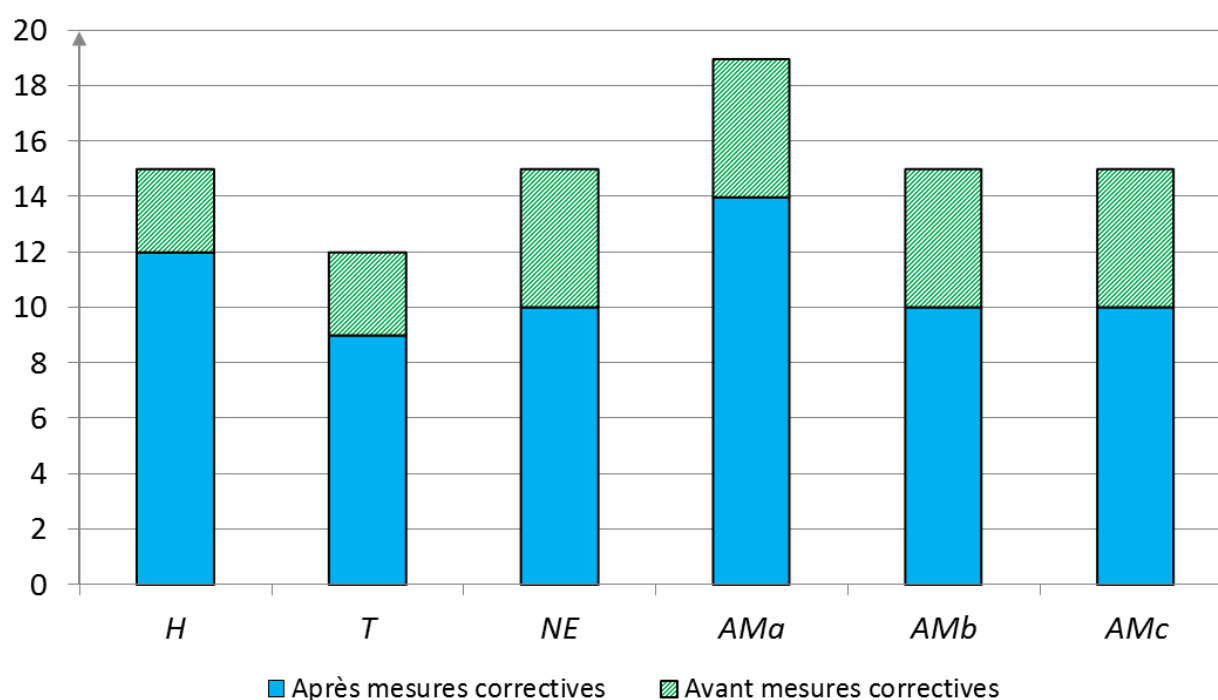


Figure 4-2 : Comparatif des vulnérabilités pour l'équipement T2

Il a été ainsi possible de ramener quasiment toutes les vulnérabilités en dessous du seuil que les décideurs et les gestionnaires s'étaient fixé. Il y existe bien sur nombre d'autres mesures à appliquer, d'autres dispositifs à mettre en place pour ramener toutes les valeurs sous le seuil.

En dernier recours, il est par exemple possible d'en venir à changer complètement d'équipement pour le remplacer par un neuf (tout en maintenant les améliorations prévues), ce qui diminue ainsi la valeur d'âge, et donc la vulnérabilité, mais il ne faut pas perdre de vue le fait que d'autres mesures ont déjà été mises en place. Ces dernières ont des coûts, et un tel choix d'action ne peut qu'accentuer les frais déjà conséquents engagés pour réduire la vulnérabilité.

Il est possible de faire ces analyses pour tous les équipements concernés de la MRC, et de voir également pour chacun d'eux l'impact de chaque décision sur les valeurs de vulnérabilité. Ce sont ces combinaisons et leurs impacts, alliés à une analyse du coût de la mise en place des mesures correspondantes qui guideront les décideurs vers la mise en place d'une solution adéquate et conforme à leurs stratégies de gestion.

4.2 Vulnérabilité, vieillissement et conditions de fonctionnement

4.2.1 Contexte et paramètres

Le but de la présente étude est d'étudier l'impact du vieillissement et de la modification de l'environnement de fonctionnement donné, et de voir ainsi en quoi ces changements influent sur les valeurs de vulnérabilités déterminées aujourd'hui. Le cas qui sera étudié ici sera à nouveau celui de l'application d'une même politique de gestion globale pour tous les FC, politique qui sera considérée comme souple. En accord avec une telle estimation, il conviendra de fixer un seuil de vulnérabilité de 15 pour les besoins de l'analyse.

Le choix de cette valeur permet de se concentrer sur les équipements les plus vulnérables de la MRC. Parmi ceux-ci, une attention toute particulière est accordée à l'équipement H1, dans la mesure où il se trouve être légèrement supérieure à la limite, et ce pour un faible nombre de FC. Il constitue ainsi un candidat idéal pour cette étude, car s'il semble facile de lui apporter des correctifs afin d'en réduire la vulnérabilité, il appartient de savoir si ces mesures seront toujours suffisantes dans dix ans, en plus d'éventuels changements des conditions climatiques.

La figure et le tableau suivant récapitulent les différentes valeurs de vulnérabilité obtenues après la première analyse ainsi que les paramètres pris alors en compte :

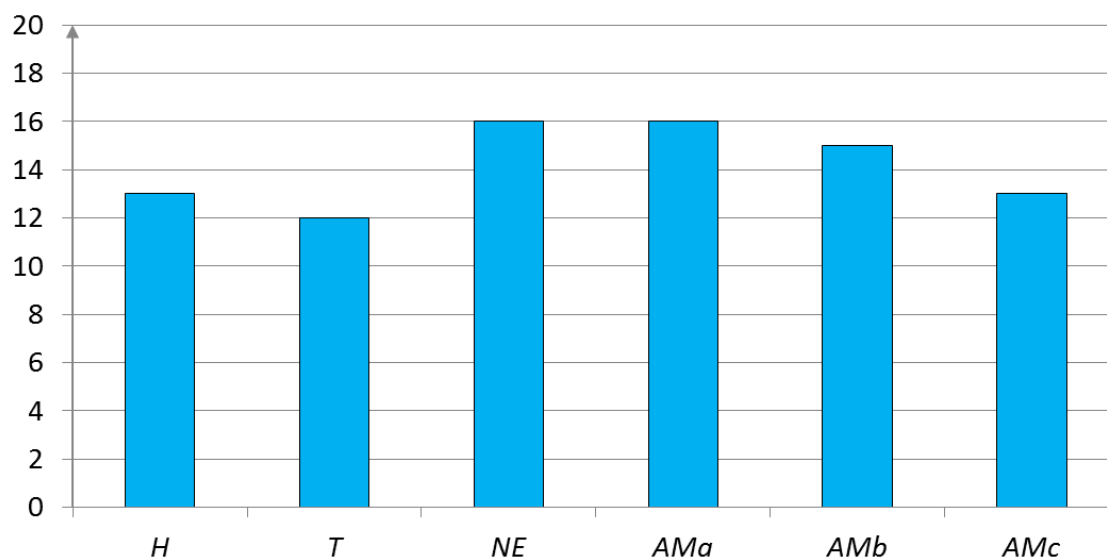


Figure 4-3 : Vulnérabilité de l'équipement H1 selon les différents FC

Tableau 4-3 : Paramètres caractéristiques pour l'équipement H1

SENSIBILITÉ DE BASE					
Couple énergie actionneur	MH	Proximité cours / points d'eau	1	Humidité	4
Protection - Humidité	0	Proximité littoraux	0	Température	4
Protection - Température	0			Niveau d'eau	4
Protection - NE	0			Actions mécaniques	4
Protection - AM	1				
Mesures spécifiques	1				
AGGRAVATEURS DE SENSIBILITÉ					
État	3	Relief	0	Durée évènement	2
Âge	4				
Emplacement	1				
Entretien	1				
Dépendance SE unique	0				
CRITICITÉ DE BASE					
Note gestionnaire	5	Provenance MP	0	Diminution MP	1
Besoin MP	1				
AGGRAVATEURS DE CRITICITÉ					
Densité	4	Zone d'importance	1		

4.2.2 Choix des changements de conditions

Il convient désormais de définir les nouvelles conditions de fonctionnement ainsi que les paramètres qui seront affectés. Le choix fait est ici purement arbitraire et indicatif :

- *Humidité* : les aléas climatiques apportent plus d'humidité (pluies plus intenses);
- *Niveau d'eau* : consécutivement, les hausses du niveau d'eau sont plus importantes;
- *Âge* : la nouvelle étude se projette 10 ans après la précédente ;
- *État* : après plusieurs années une dégradation de l'équipement est constatée;
- *Durée évènement* : les aléas climatiques sont considérés comme plus persistants.

L'impact de ces modifications de conditions sur les paramètres est reporté sur le tableau suivant :

Tableau 4-4 : Paramètres pour l'équipement H1 après application des changements

SENSIBILITÉ DE BASE					
Couple énergie actionneur	MH	Proximité cours / points d'eau	1	Humidité	5
Protection - Humidité	0	Proximité littoraux	0	Température	4
Protection - Température	0			Niveau d'eau	5
Protection - NE	0			Actions mécaniques	4
Protection - AM	1				
Mesures spécifiques	1				
AGGRAVATEURS DE SENSIBILITÉ					
État	4	Relief	0	Durée évènement	3
Âge	5				
Emplacement	1				
Entretien	1				
Dépendance SE unique	0				
CRITICITÉ DE BASE					
Note gestionnaire	5	Provenance MP	0	Diminution MP	1
Besoin MP	1				
AGGRAVATEURS DE CRITICITÉ					
Densité	4	Zone d'importance	1		

4.2.3 Nouvelle analyse de vulnérabilité

Les changements de paramètres qui ont été posés plus haut sont avant tout des indicateurs de potentiels changements à venir, notamment de changements directement liés aux variations du climat. Encore une fois les choix proposés ici ne servent que d'exemples et il conviendra dans de futures applications de la méthode de considérer les projections réelles pour les régions et les MRC à l'étude.

Ici le fait d'avoir une augmentation de l'intensité des aléas vecteurs d'humidité augmente du même coup l'exposition de l'équipement aux facteurs climatiques « Humidité » et « Niveau d'eau », et donc directement les vulnérabilités associées. De même, passé un certain temps, l'état de l'infrastructure va se détériorer, ce qui va la rendre bien plus sensible aux différents aléas, et donc directement aux différents FC associés. Enfin, le fait de considérer une augmentation de la persistance (donc de la durée) des événements climatiques va également accroître la sensibilité aux FC car les équipements sont soumis pendant de plus longues durées à des contraintes liées aux conditions climatiques. L'application de la base de règles avec les nouveaux paramètres donne les résultats suivants :

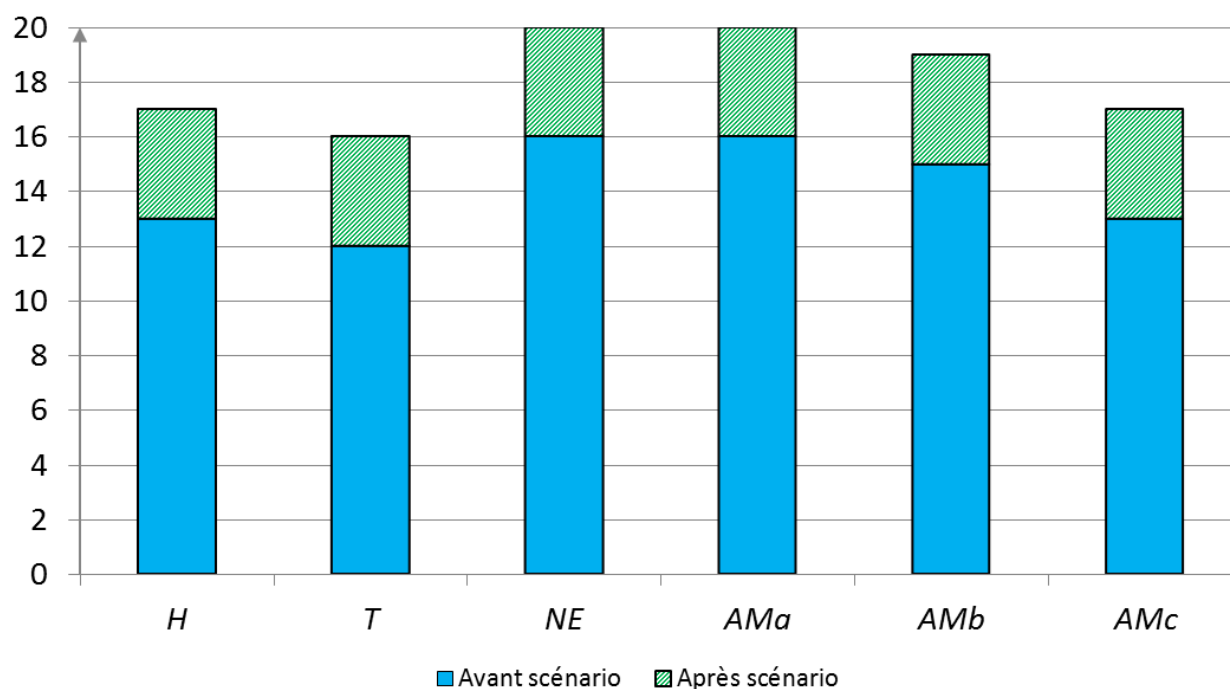


Figure 4-4 : Comparatif des vulnérabilités pour l'équipement H1

Les vulnérabilités se sont toutes grandement accentuées, et la nécessité de mettre en place un grand nombre de mesures correctrices se fait sentir, nombre bien plus important qu'au premier abord. A terme, il devient même impératif de changer complètement l'équipement considéré afin d'avoir la certitude de le ramener à des niveaux de vulnérabilité acceptables. Une telle analyse peut être menée de concert avec la précédente anticipation des impacts des mesures correctives, ce qui permet d'obtenir une stratégie de réduction de la vulnérabilité à bien plus long terme.

Il est tout à fait possible d'envisager une multitude de cas d'évolution de la vulnérabilité. Ici le choix a été fait de se concentrer sur une accentuation des événements climatiques de nature hydraulique, mais une autre alternative aurait pu être de considérer une augmentation des épisodes de canicules et de sécheresse. De manière générale, il faudra à l'avenir utiliser les prévisions des experts en changements climatiques afin de voir comment évoluent les paramètres liés aux aléas, mais aussi certains autres, plus subtilement influencés (comme l'État par exemple, avec également un recours aux experts en infrastructures essentielles). Ainsi complétée, la méthodologie peut devenir un outil très utile pour évaluer les possibilités d'adaptation des régions aux CC et à leurs conséquences.

4.3 Perspectives et améliorations possibles

Les deux précédentes analyses ouvrent la porte à de nouvelles considérations permettant de compléter la méthodologie précédemment développée. En effet bien que la méthode permet d'obtenir un portrait de la vulnérabilité actuelle de la MRC ou de la région, elle nécessite des analyses plus spécifiques afin d'en caractériser l'évolution dans le temps.

Un atout indéniable serait de pouvoir intégrer directement les modifications attendues des conditions climatiques à l'échelle de la région, en accord avec les projections et les modèles climatiques développés par les experts en CC. Ces modifications auraient lieu directement dans la base de connaissances et s'ajouteraient ainsi comme une quatrième caractérisation de l'équipement dans la base de faits (voir Tableau 2-5), une caractérisation en terme de changements climatiques à venir. La liste suivante donne un aperçu des différents faits pouvant être inclus dans la base de connaissances afin d'approfondir les analyses de vulnérabilité :

- *La fréquence des aléas climatiques* qui traduira l'augmentation ou la diminution des périodes moyennes entre deux événements climatiques extrêmes, ce qui aura une influence directe sur l'exposition d'un équipement et des MP aux divers FC et donc la sensibilité de base;
- *L'intensité des aléas climatiques* qui traduira l'augmentation ou la diminution des impacts directs des CC sur les infrastructures essentielles (importance des dégradations ou des délais de rétablissement par exemple), ce qui influera directement sur la sensibilité de base d'un équipement à différents FC;
- *La persistance des conséquences* qui découle directement de l'augmentation de la durée d'un événement, dans la mesure où plus les événements sont longs et plus leurs conséquences ont d'impacts sur les systèmes touchés, et qui influera ainsi sur la sensibilité à divers FC donnés, principalement en tant qu'aggravateur;
- *Les scénarios préférentiels* qui consistent à appliquer des facteurs pondérateurs aux différents facteurs climatiques afin de tenir compte des tendances dans les changements observés par l'intermédiaire des modèles et des analyses climatiques, changements qui auront ainsi des impacts sur l'exposition et donc la sensibilité aux FC.

Ces nouveaux paramètres ne sont ici qu'un exemple de ce qu'il est possible d'implanter directement dans la méthodologie afin de mettre à disposition des décideurs des analyses de vulnérabilité prenant en compte les nouvelles conditions de fonctionnement des équipements découlant des changements climatiques à venir. Ce sont ces mêmes considérations qui avaient été au centre de la deuxième analyse spécifique proposée, mais l'intérêt est ici de faire en sorte qu'elles soient directement intégrées à la base de connaissances en formulant les règles adéquates.

De cette manière, il suffit uniquement de rajouter de nouvelles règles associées aux nouveaux faits qui ont été introduits, et ainsi l'application de la méthodologie donnera directement les nouveaux résultats de vulnérabilité corrigés selon les tendances climatiques. Le tableau suivant donne un exemple de la nouvelle base de faits ainsi formée :

Tableau 4-5 : Exemple de la nouvelle base de faits

ÉQUIPEMENTS	GÉOGRAPHIE	ALÉAS CLIMATIQUES	CHANGEMENTS CLIMATIQUES
SENSIBILITÉ DE BASE			
Couple énergie actionneur	Proximité littoraux	Humidité	Fréquence - FC
Protection - Humidité	Proximité cours/points eau	Température	Scénarios
Protection - Température		Niveau d'eau	Intensité - FC
Protection - Niveau eau		Actions mécaniques	
Protection - Actions mécaniques			
Mesures spécifiques			
AGGRAVATEURS DE SENSIBILITÉ			
État	Relief	Durée évènement	Durée conséquences
Âge			
Emplacement			
Entretien			
CRITICITÉ DE BASE			
Importance pour gestionnaire	Provenance MP	Diminution MP	
Besoin MP			
AGGRAVATEURS DE CRITICITÉ			
Densité	Zone importance		

Encore une fois, les éléments présentés ici sont des pistes d'améliorations possibles, et n'ont pas vocation à constituer une liste exhaustive. Comme cela a été évoqué précédemment, un autre aspect qu'il faudra explorer sera la prise en compte des effets dominos et des interdépendances caractéristiques des liens existant entre systèmes essentiels d'un même territoire, dans la mesure où cela fait intervenir la notion nouvelle d'importance propre.

Ces éléments pourront également être intégrés dans la base, mais cette fois dans la définition de la criticité des équipements, car ils auront une influence manifeste sur la place et l'importance qui sont accordées à ces infrastructures au sein du réseau des SE du territoire. Ainsi, un équipement qui pourra être considéré comme critique aux yeux de son gestionnaire peut s'avérer au final d'un faible impact après analyse des effets domino résultants de sa défaillance. À l'inverse, il est tout à fait possible qu'un équipement considéré comme d'une importance négligeable s'avère jouer un rôle crucial au cœur de tout un système d'interdépendances, ce qui nécessitera de revoir complètement la stratégie à mettre en place pour en réduire la vulnérabilité.

4.4 Limites de la méthodologie

Outre les potentielles améliorations pouvant être apportées à la méthodologie, il convient à présent d'en détailler les limites, qui feront également partie des éléments à prendre en considération lors de la transformation de la méthode en un outil décisionnel performant.

Une des premières limites de la méthodologie actuelle réside dans l'absence de prise en compte du facteur financier dans les critères de choix des mesures d'adaptation à mettre en place. En effet, bien que les utilisations spécifiques de la méthode permettent d'anticiper les effets de telles mesures et donnent ainsi aux décideurs les clés pour prioriser celles qui sont les plus adaptées, la méthodologie ne conduit pas forcément au le choix le plus efficace économiquement parlant.

Ainsi il conviendrait de rajouter de nouveaux indicateurs financiers capables d'évaluer les coûts de la mise en place des mesures de réduction de la vulnérabilité, et de proposer ainsi aux gestionnaires un ensemble de solutions en fonction de l'investissement qu'ils sont prêts à réaliser pour réduire la vulnérabilité de la MRC. Par exemple, il serait possible de proposer une première analyse sans critères financiers, puis une analyse montrant les différents ensembles de procédures pouvant être implantées selon le montant de l'investissement disponible. De tels critères ont en effet toute leur importance aux yeux des décideurs et s'inscrivent dans les politiques de gestion qui assurent le bon fonctionnement des services de la MRC.

Une autre des principales limites, et probablement également l'un des plus gros enjeux de la transformation de la méthodologie en outil décisionnel, est la manière dont les paramètres sont évalués. Les échelles de ces derniers ont en effet été basées pour la plupart sur des critères arbitraires et ne proposent qu'un ensemble discret d'état pouvant être pris, états qui peuvent s'avérer peu représentatifs. Ainsi, le fait de ne proposer qu'une approche « tout-ou-rien » pour certains d'entre eux, comme par exemple pour évaluer l'entretien ou le besoin en matières premières, peut poser problème lors de discussions entre experts et décideurs. Il serait ainsi plus juste de proposer de nouvelles évaluations pour ce genre de paramètres, en accord avec la vision des gestionnaires des équipements considérés, en se tournant vers des variables continues par exemple ou en doublant le nombre d'états.

Toujours en lien avec les critères d'évaluation des paramètres, le recours au jugement humain est également une limite importante dont il faut tenir compte. Comme cela a été suggéré depuis la figure 1-1 au début de ce mémoire, une grande partie du développement de l'outil décisionnel souhaité à partir de la méthodologie passe par une validation conjointe d'experts en SE et en CC. De telles validations, que ce soit sur les paramètres ou sur leur évaluation, passe principalement par le jugement humain, avec toutes les problématiques qui y sont associées. Bien que cet avis soit émis par des experts qualifiés, il n'en demeure pas moins difficile de régler les points de désaccord de manière objective, par exemple quand à la valeur à attribuer à un paramètre lors de son évaluation. Ces problématiques sont d'autant plus importantes qu'aux experts en SE et CC peuvent se joindre éventuellement des décideurs municipaux, mais aussi des gestionnaires d'équipements et de services, et que ces deux acteurs majeurs peuvent ne pas avoir les mêmes avis sur les politiques de gestion à mettre en place.

Une telle problématique soulève ainsi la question de la robustesse de la méthode, qui peut être remise en cause sans la mise en place d'un cadre décisionnel précis, d'une série de règles permettant à chaque acteur et à chaque expert de faire entendre sa voix et de permettre l'obtention d'un consensus entre les différentes parties prenantes. En 2008, le Comité sur la vulnérabilité de l'ingénierie des infrastructures publiques (CVIIP) a ainsi soumis au vote de ses participants certains éléments relevant de la vulnérabilité des infrastructures, afin d'obtenir une vision commune dans nombre de phases décisionnelles (CVIIP, 2008). Aussi faudra-t-il mettre en place de telles mesures afin de s'assurer de limiter cette part de subjectivité néfaste au bon développement de la méthodologie.

CONCLUSION

L'objectif des présents travaux était de pouvoir explorer et fournir les bases d'une méthodologie permettant de conjuguer les connaissances de deux mondes : celui des experts en changements climatiques et celui des experts en système essentiel, et ce afin de pouvoir évaluer la vulnérabilité des systèmes essentiels d'une région aux changements climatiques. La difficulté de l'approche proposée dans ce mémoire était de pouvoir concilier les visions de ces deux mondes tout en usant des connaissances propres à chacun d'entre eux pour répondre à la problématique initiale. L'idée était ainsi de parvenir à une approche mixte qui n'exclue aucune vision au profit de l'autre, et ce bien que ne bénéficiant pas initialement des deux expertises associées, ce qui constituerait une première dans ce domaine.

Face à un tel défi, le choix a été fait de proposer une méthodologie proche de celle utilisée dans le développement de systèmes experts, afin de compenser ce manque de connaissances par une simulation du raisonnement combiné que pourrait mener un expert mixte, ayant des connaissances tant en CC qu'en SE.

Il a ainsi été nécessaire de déterminer des paramètres communs à tous les types d'équipements, de même qu'à tous les types d'événements climatiques et de les combiner en une base de faits. De grands types d'impacts, les facteurs climatiques, ont ainsi été identifiés et l'objectif de la méthode s'est alors porté sur l'évaluation de la vulnérabilité des équipements à chacun de ces facteurs climatiques, afin de prendre en compte l'aspect pluriel de la notion de vulnérabilité. C'est également en raison de cet aspect que sa caractérisation s'effectue au moyen d'une base de règles qui permet dans un premier temps l'évaluation de la sensibilité, puis celle de la criticité d'un équipement, et enfin la combinaison des deux.

Pour éprouver la méthodologie, une série d'analyses ont été menées sur un environnement-test fictif, qui ont permis de mettre à l'épreuve les éléments du modèle tout en fournissant les bases pour des utilisations bien spécifiques, comme la possibilité d'anticiper l'impact du vieillissement et de la modification des conditions climatiques, ou encore de prévoir les effets de la mise en place de diverses solutions visant à réduire la vulnérabilité.

De telles analyses ouvrent par ailleurs la voie à un certain nombre d'optimisations potentielles visant à enrichir la précision et la pertinence de la méthode. Toutefois, elles ouvrent également la porte à de nombreux questionnements concernant les limites de la méthodologie actuelle, notamment sur l'importance du jugement humain lors de l'évaluation des paramètres ou encore de la nécessité de prendre en compte les facteurs financiers dans la recherche de la réduction de la vulnérabilité. Ces derniers éléments constituent des enjeux majeurs à prendre en considération dans la transformation de la méthodologie.

Il reste ainsi encore un certain nombre de corrections à effectuer, et le modèle pourrait évoluer sous la forme d'un outil décisionnel complet s'il était possible de réunir directement les experts des CC (comme ceux du consortium Ouranos) et les experts en infrastructures essentielles (comme ceux du CRP) afin d'obtenir une complète validation des postulats de recherche et des paramètres posés pour la méthode. Une telle collaboration autour du développement d'un outil décisionnel spécifique s'inspirerait des rencontres effectuées dans le cadre du CVIIP et permettrait de fournir des solutions aux problèmes d'adaptation des municipalités aux CC, problèmes rencontrés actuellement partout dans le monde et qui deviennent un enjeu majeur des années à venir.

Dans une telle optique, une attention particulière devra être apportée à la prise en compte des effets domino, qui constituent également un enjeu majeur dans la compréhension de la réaction des réseaux d'un territoire donné suite à une défaillance. Des outils ont déjà été développées à cet effet par le CRP, comme le système DOMINO, et les données issues d'un tel système enrichiraient et amélioreraient le modèle proposé dans ce mémoire. Il constituerait alors un moyen de fournir les renseignements sur l'évolution et la propagation des défaillances directement résultantes des conséquences des CC, et pourrait être ainsi une bonne approche de l'outil décisionnel souhaité.

LISTE DE RÉFÉRENCES

- Associated Program on Flood Management. (2006). *Environmental Aspects of Integrated Flood Management*. (92-63-11009-3). Genève: World Meteorological Organization.
- Auld, H., Klaassen, J., & Comer, N. (2007). *L'altération atmosphérique des bâtiments et les changements climatiques : les options d'adaptation*. Canada: Groupe de recherche sur l'adaptation et les répercussions, Environnement Canada.
<http://www.ec.gc.ca/Publications/default.asp?lang=Fr&xml=C35FAE12-0531-46F3-9378-BDF10096234D>
- Burroughs, W. J. (2007). *Climate change : a multidisciplinary approach* (2nd éd.). Cambridge, UK.: Cambridge University Press.
- Centre Européen de Prévention du Risque d'Inondation. (2010). *Le bâtiment face à l'inondation : Diagnostiquer et réduire sa vulnérabilité*. Tiré de Centre Européen de Prévention du Risque d'Inondation.
- Comité sur la vulnérabilité de l'ingénierie des infrastructures publiques. *Premier rapport sur l'évaluation nationale de la vulnérabilité de l'ingénierie*. Consulté le 20 Mars 2012, Tiré de http://www.pievc.ca/f/doc_list.cfm?dsid=4
- Conseil canadien des ingénieurs. (2008). *Adaptation au changement climatique : Première évaluation nationale de la vulnérabilité de l'ingénierie des infrastructures publiques au Canada*. Tiré de Conseil canadien des ingénieurs.
- Dictionnaire Larousse. *Définition : équipement*. Consulté le 14 Mai 2012, Tiré de <http://www.larousse.fr/dictionnaires/francais/%C3%A9quipement>
- Direction de la santé environnementale et de la toxicologie. (2010). *Proposition d'indicateurs aux fins de vigie et de surveillance des troubles de la santé liés aux vents violents*. Montréal: Bibliothèque et Archives nationales du Québec.
- Dubrion, R.-P. (2008). *Le climat et ses excès : les excès climatiques français de 1700 à nos jours*. Bordeaux: Féret.
- Encyclopédie Larousse. Article : énergie. Consulté le 14 Mai 2012, Tiré de <http://www.larousse.fr/encyclopedie/nom-commun-nom/%E9nergie/47746#328862>
- Füssel, H.-M., & Klein, R. J. T. (2006). Climate change vulnerability assessments : an evolution of conceptual thinking. *Climatic Change*, 75(3), 301-329. doi:10.1007/s10584-006-0329-3
- Giarratano, J. R., G. (1998). *Expert systems : Principles and programming* (3^e éd.). États-Unis: PWS Publishing Company.
- Gondran, M. (1986). *Introduction aux systèmes experts* (3^e éd.). Paris: Eyrolles.
- Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat [GIEC]. (2007a). *Bilan 2007 des changements climatiques : Conséquences, adaptation et vulnérabilité - Annexe I*. (978-0521-88010-7). Cambridge: Cambridge University Press.

- Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat [GIEC]. (2007b). *Changements climatiques 2007 : Les éléments scientifiques - Chapitre 8*. (978-0521-70596-7). Cambridge: Cambridge University Press.
- Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat [GIEC]. (2007c). *Changements climatiques 2007 : Rapport de synthèse*. (92-9169-222-0). Cambridge: Cambridge University Press.
- Hausmann, P. (1999). *Les inondations, un risque assurable ?* (201-98142-fr). Zurich: Swiss Re Publishing.
- Hubert, A. (2008). *Commande de systèmes dynamiques - Introduction à la modélisation et au contrôle des systèmes automatiques*. Besançon, France: Presses universitaires de Franche-Comté.
- Jackson, P. (1990). *Introduction to expert systems* (2^e éd.). Grande-Bretagne: Addison-Wesley Publishing Company.
- Le Petit Robert. (2012). *Vulnérabilité Le Petit Robert 2009*. (pp. 589). Paris: Le Robert.
- Liebowitz, J., Taylor, O., Smith, P., MacIntyre, J., Trait, J., & Darr, T. P., et al. (1998). *The Handbook of applied expert systems* (1^e éd.). Boston: CRC Press.
- Metz, B. (2010). *Controlling climate change* (1^e éd.). Cambridge: Cambridge University Press.
- Ministère de l'Écologie, du Développement durable, des Transports et du Logement (2011). *Plan national d'adaptation de la France aux effets du changement climatique*. France: Direction générale de l'Énergie et du Climat.
- Ministère de la Sécurité publique du Canada. *Infrastructures essentielles*. Consulté le 4 juin 2012, Tiré de <http://www.publicsafety.gc.ca/prg/ns/ci/index-fra.aspx>
- Ministère de la Sécurité publique du Québec. *Sûreté des infrastructures stratégiques*. Consulté le 4 Juin 2012, Tiré de <http://www.securitepublique.gouv.qc.ca/police/securite-etat/protection-infrastructures.html>
- Ministère de la Sécurité publique du Québec. (2008). *Concepts de base en sécurité civile*. (978-2-550-54253-7). Montréal: Bibliothèque et Archives nationales du Québec.
- Moreno, S., & Peulot, E. (2009). *Le GRAFCET : Conception - Implantation dans les Automates Programmables Industriels*. France: Casteilla.
- Mortureux, Y. (2005). *AMDE(C)*. (SE 4 040). Tiré de Techniques de l'Ingénieur. <http://www.techniques-ingenieur.fr.rp1.ensam.eu/res/pdf/encyclopedia/42155210-se4040.pdf>
- Neault, J.-M., Robert, B., & Dufour, D. (2009). *Démarche gouvernementale de résilience des systèmes essentiels*. Colloque 2009 sur la sécurité civile, Saint-Hyacinthe, QC. <http://www.msp.gouv.qc.ca/securite-civile/securite-civile-quebec/activites-evenements/colloque/colloque-2009/1173.html>
- Organisation des Nations Unies [ONU]. (1992). *Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques*. (FCCC/INFORMAL/84 GE.05-62221). Tiré de Organisation des Nations Unies.

- Ouranos. (2010a). *Élaborer un plan d'adaptation aux changements climatiques : Guide destiné au milieu municipal québécois*. Tiré de Ouranos.
- Ouranos. (2010b). *Savoir s'adapter aux changements climatiques*. (ISBN 978-2-923292-03-8). Montréal: Bibliothèque nationale du Québec.
- Pageon, J. L. (2008). *Méthodologie d'évaluation de la vulnérabilité d'une MRC face aux ressources essentielles*. M.Sc.A, École Polytechnique de Montréal, Qc., Canada.
- Petit, F., & Robert, B. (2009). *Concepts to analyse the vulnerability of critical infrastructures – Taking into account cybernetics*. The 2nd International Multi-Conference on Society, Cybernetics and Informatics, Orlando, Florida, USA.
- Pew Center on Global Climate Change. (2001). *Climate change : Science, strategies and solutions* (1^e éd.). Arlington: Brill.
- Reniers, G. L. L., Dullaert, W., Ale, B. J. M., & Soudan, K. (2005). Developing an external domino accident prevention framework: Hazwim. *Journal of loss prevention in the process industries*, 13(3), 127-138.
- Rinaldi, S. M., Peerenboom, J. P., & Kelly, T. K. (2001). Identifying, understanding, and analyzing critical infrastructures interdependencies. *IEEE Control Systems Magazine*, 21(6), 11-25.
- Riser, J. (2010). *Les espaces du vent*. Versailles: Éditions Quae.
- Robert, B., Morabito, L., & Cloutier, I. (2012). Modeling and Coordinating Interdependent Critical Infrastructures in Montreal. *The CIP Report*, 10(11), 3-6.
- Robert, B., Pinel, W., Pairet, J.-Y., Rey, B., Coeugnard, C., Hémond, Y., . . . Cloutier, I. (2009). *Résilience organisationnelle - Concepts et méthodologie d'évaluation*. Montréal: Presses internationales Polytechnique.
- Smit, B., Burton, I., Klein, R. J. T., & Wandel, J. (2000). An anatomy of adaptation to climate change and variability. *Climatic Change*, 45, 223-251.
- Vigneron, S., Dégardin, F., Guézo, B., Oustric, A., Baladès, J.-D., Le Nouveau, N., Felts, D., & Arrivé, E. (2005). *Réduire la vulnérabilité des réseaux urbains aux inondations*. Paris: Ministère de l'Écologie et du Développement durable.
- Warren, F. J., Barrow, E., Schwartz, R., Andrey, J., Mills, B., & Riedel, D. (2004). *Impacts et adaptation liés aux changements climatiques : perspective canadienne*. Ottawa: Direction des impacts et de l'adaptation liés aux changements climatiques, Ressources naturelles Canada,.

ANNEXE 1 – Conséquences des évènements climatiques

ÉVÈNEMENT	CONSÉQUENCES
<i>VENTS VIOLENTS / TORNADES</i>	Dégradations /destructions des bâtiments et infrastructures routières par l'action des vents
	Dégâts divers par projections de débris
	Destruction systèmes électriques aériens
	Destruction des cultures
	Augmentation des risques sanitaires
<i>INONDATION</i>	Dégradations/destructions des bâtiments et infrastructures routières par l'action du courant
	Pannes et dégradations diverses des systèmes électriques par l'action de l'humidité
	Réduction de l'accès à l'eau potable
	Destruction des cultures
	Augmentation des risques sanitaires
	Rémanence des effets (corrosion, infiltration)
	Dégâts divers par charriage de débris
<i>VAGUE DE CHALEUR</i>	Détérioration des structures et des chaussées
	Impacts importants sur la santé des personnes vulnérables
	Augmentation de la demande en eau
	Dégradation de systèmes de transformation électriques
	Pics de pollution et de consommation en électricité
	Dégradation de la qualité de l'eau
<i>PLUIE INTENSE</i>	Saturation des réseaux d'évacuation des eaux pluviales
	Favorisent l'apparition d'inondations
	Dégâts divers dus aux glissements de terrain

EVENEMENT	CONSÉQUENCES
<i>SÉCHERESSE</i>	Diminution drastique de toutes les ressources en eau
	Dégradation de la production agricole et laitière
	Diminution des moyens de transport maritimes
	Diminution de la qualité de l'eau
	Augmentation des risques sanitaires
	Diminution de la production hydroélectrique
	Dégradation des fondations et des chaussées
<i>TEMPÊTE DE VERGLAS / BLIZZARD</i>	Augmentation du risque sanitaire et de la sollicitation des réseaux de santé
	Destruction d'infrastructures électriques aériennes
	Perturbation des réseaux de télécommunications
	Dégâts divers par chutes d'objets
	Dégradations des bâtiments dues à l'accumulation de glace
	Rémanence des effets (corrosion, infiltration)
	Inondations potentielles à la fonte des glaces
<i>GRÊLE</i>	Détérioration des structures et des bâtiments
	Dégâts importants sur les cultures
	Impacts sur la santé des personnes
<i>AUGMENTATION DU NIVEAU DE LA MER</i>	Modification de l'amplitude des marées
	Érosion des zones côtières
	Dégâts divers sur les structures côtières
	Diminution de la qualité de l'eau (remontée de l'eau salée dans les nappes)
<i>ONDE DE TEMPÊTE</i>	Destruction des structures côtières
	Diminution de la qualité de l'eau

ANNEXE 2 – Potentiels d'impact des facteurs climatiques

HUMIDITÉ

	M	H	T	E	C	R	N
M	2	1	1	3			
H	1	1					
T	2		1		2		
E	3		3	5	3		
C	2		0	3	2		
R			0	3	0		
N			0				

TEMPÉRATURE

	M	H	T	E	C	R	N
M	1	1	2	3			
H	1	1					
T	1		2		3		
E	3		4	2	4		
C	1		1	4	3		
R			1	2	1		
N			1				

NIVEAU D'EAU

	M	H	T	E	C	R	N
M	2	1	1	3			
H	1	1					
T	2		1		2		
E	3		3	3	3		
C	2		1	3	2		
R			1	3	1		
N			1				

ACTIONS MÉCANIQUES

	M	H	T	E	C	R	N
M	1 5 3	2 2 3	4 2 1	1 3 2			
H	2 3 4	1 1 3					
T	2 2 4		3 5 1		3 4 1		
E	3 1 2		4 2 2	2 3 3	1 1 5		
C	2 2 2		1 3 3	4 2 1	2 3 3		
R			2 4 4	3 4 4	2 4 1		
N			1 5 5				

ANNEXE 3 – Description des paramètres

PARAMÈTRES DE SENSIBILITÉ DE BASE

INTENSITÉ DES FC : HUMIDITÉ – TEMPÉRATURE – NIVEAU D’EAU – ACTIONS MÉCANIQUES		
<i>Très faible</i>	1	L’intensité du FC est inférieure à 25% de son intensité moyenne
<i>Faible</i>	2	L’intensité du FC est comprise entre 25% et 75% de son intensité moyenne
<i>Moyen</i>	3	L’intensité du FC est comprise entre 75% et 125% de son intensité moyenne
<i>Fort</i>	4	L’intensité du FC est comprise entre 125% et 175% de son intensité moyenne
<i>Très fort</i>	5	L’intensité du FC est supérieure à 175% de son intensité moyenne
PROTECTION CONTRE LES FC : HUMIDITÉ – TEMPÉRATURE – NIVEAU D’EAU – ACTIONS MÉCANIQUES		
<i>Non protégé</i>	0	L’équipement ne possède aucune protection spécifique au FC donné
<i>Protégé</i>	1	L’équipement possède au moins un type de protection spécifique au FC donné
MESURES SPÉCIFIQUES		
<i>Non</i>	0	Il n’existe aucune procédure ou mesure de gestion spécifique à l’équipement
<i>Oui</i>	1	Il existe un ensemble de procédures de gestion spécifique à l’équipement
PROXIMITÉ DES LITTORAUX		
<i>Non</i>	0	L’équipement est considéré comme éloigné d’une zone côtière
<i>Oui</i>	1	L’équipement est considéré comme proche ou sur une zone côtière
PROXIMITÉ D’UN COURS OU D’UN POINT D’EAU		
<i>Non</i>	0	L’équipement est considéré comme éloigné d’une zone fluviale ou d’un lac
<i>Oui</i>	1	L’équipement est considéré comme proche ou sur une zone fluviale ou un lac

AGGRAVATEURS DE SENSIBILITÉ

ÉTAT DE L'ÉQUIPEMENT		
<i>Intact</i>	1	L'équipement présente une durabilité comprise entre 100% et 80% de celle d'origine
<i>Abimé</i>	2	L'équipement présente une durabilité comprise entre 80% et 60% de celle d'origine
<i>Endommagé</i>	3	L'équipement présente une durabilité comprise entre 60% et 40% de celle d'origine
<i>Défectueux</i>	4	L'équipement présente une durabilité comprise entre 40% et 20% de celle d'origine
<i>Ruiné</i>	5	L'équipement présente une durabilité inférieure à 20% de celle d'origine
ÂGE DE L'ÉQUIPEMENT		
<i>Neuf</i>	1	L'âge de l'équipement est inférieur à 10% de sa durée de vie moyenne
<i>Quasi-neuf</i>	2	L'âge de l'équipement est compris entre 10% et 50% de sa durée de vie moyenne
<i>Mature</i>	3	L'âge de l'équipement est compris entre 50% et 80% de sa durée de vie moyenne
<i>Âgé</i>	4	L'âge de l'équipement est compris entre 80% et 120% de sa durée de vie moyenne
<i>Antique</i>	5	L'âge de l'équipement est inférieur à 120% de sa durée de vie moyenne
EMPLACEMENT DE L'ÉQUIPEMENT		
<i>Au sol</i>	1	L'équipement est installé au niveau du sol
<i>Enterré</i>	2	L'équipement est installé sous la surface du sol
<i>Aérien</i>	3	L'équipement est installé en hauteur
<i>Immergé</i>	4	L'équipement est installé sous la surface de l'eau
ENTRETIEN		
<i>Non entretenu</i>	0	L'équipement ne possède aucune procédure de maintenance ou d'entretien
<i>Entretenu</i>	1	L'équipement possède un ensemble de procédures de maintenance ou d'entretien
DÉPENDANCE À UN SE UNIQUE		
<i>Non</i>	0	L'équipement dépend pour son bon fonctionnement d'un autre unique système
<i>Oui</i>	1	L'équipement ne possède aucune dépendance spécifique à un autre système

POSITION DE L'ÉQUIPEMENT		
<i>Plaine</i>	0	L'équipement est positionné dans une zone à faible dénivelé
<i>Cuvette</i>	-1	L'équipement est positionné dans une dépression du relief
<i>Élévation</i>	1	L'équipement est installé sur une surélévation du relief
<i>Colline</i>	2	L'équipement est installé sur une surélévation très importante du relief
DURÉE DE L'ÉVÈNEMENT		
<i>Court</i>	1	L'évènement considéré est d'une durée inférieure à 72h
<i>Moyen</i>	2	L'évènement considéré est d'une durée comprise entre 72h et un mois
<i>Long</i>	3	L'évènement considéré est d'une durée supérieure à un mois

PARAMÈTRES DE CRITICITÉ DE BASE

NOTE DU GESTIONNAIRE		
<i>Mineure</i>	1	L'équipement est considéré comme étant d'importance négligeable
<i>Faible</i>	2	L'équipement est considéré comme étant d'importance faible
<i>Moyenne</i>	3	L'équipement est considéré comme étant d'importance modérée
<i>Élevée</i>	4	L'équipement est considéré comme étant de grande importance
<i>Très Élevée</i>	5	L'équipement est considéré comme étant d'importance vitale
BESOIN EN MATIÈRES PREMIÈRES		
<i>Non</i>	0	L'équipement ne nécessite aucune MP pour son fonctionnement
<i>Oui</i>	1	L'équipement nécessite au moins un type de MP pour son fonctionnement
PROVENANCE DE LA MATIÈRE PREMIÈRE		
<i>Locale</i>	0	La MP nécessaire à l'équipement provient de la MRC
<i>Externe</i>	1	La MP nécessaire à l'équipement provient de l'extérieur de la MRC
DIMINUTION DE MATIÈRE PREMIÈRE		
<i>Non</i>	0	L'évènement climatique n'altère pas la MP nécessaire à l'équipement
<i>Oui</i>	1	L'évènement climatique altère la MP nécessaire à l'équipement

AGGRAVATEURS DE CRITICITÉ

DENSITÉ		
<i>Négligeable</i>	1	Il n'existe aucun autre équipement du même type à proximité
<i>Faible</i>	2	Il existe entre un et deux autres équipements du même type à proximité
<i>Moyenne</i>	3	Il existe entre deux et cinq autres équipements du même type à proximité
<i>Élevée</i>	4	Il existe entre cinq et dix autres équipements du même type à proximité
<i>Très Élevée</i>	5	Il existe plus de dix autres équipements du même type à proximité
ZONE D'IMPORTANCE		
<i>Non</i>	0	L'équipement n'est pas implanté dans une zone d'importance stratégique
<i>Oui</i>	1	L'équipement est implanté dans une zone d'importance stratégique

ANNEXE 4 – Types d’actionneurs

<i>Entrée \ Sortie</i>	MÉCANIQUE	HYDRAULIQUE	THERMIQUE	ÉLECTRIQUE	CHIMIQUE
MÉCANIQUE	<i>Transmissions mécaniques - Réducteurs à engrenages - Mécanismes de transformation du mouvement - Compresseurs - Pompes pneumatiques - Pompes à vide - Pompes à membranes - Ventouses - Vérins - Moteurs</i>	<i>Compresseurs hydrauliques - Pompes hydrauliques - Echangeurs air/huile - Accumulateurs</i>	<i>Frotteurs - Pompes à chaleur - Réfrigérateurs</i>	<i>Génératrices - Alternateurs - Allumeurs à quartz</i>	
HYDRAULIQUE	<i>Vérins hydrauliques - Moteurs - Roues à aubes - Turbines</i>	<i>Amplificateurs de pression</i>			
THERMIQUE	<i>Turbines à gaz - Turbines à vapeur - Machines à vapeur</i>		<i>Échangeurs thermiques</i>		<i>Réacteurs chimiques</i>
ÉLECTRIQUE	<i>Moteurs électriques - Electroaimants</i>		<i>Résistances chauffantes</i>	<i>Composants électriques et électroniques - Transformateurs</i>	<i>Accumulateurs - Extracteurs électrolytiques</i>
CHIMIQUE	<i>Moteurs à combustion</i>		<i>Brûleurs</i>	<i>Piles sèches - Accumulateurs</i>	<i>Réacteurs chimiques</i>
RAYONNANTE			<i>Chaudières solaires - Fours à micro-ondes</i>	<i>Cellules solaires</i>	<i>Photosynthèse</i>
NUCLÉAIRE			<i>Réacteurs nucléaires</i>		

ANNEXE 5 – Base de règles

La notation suivante est utilisée pour toute l'annexe :

VALEUR (X) \leftarrow N : La valeur du paramètre X est incrémentée de N
 VALEUR (X) = N : La valeur du paramètre X vaut N

SENSIBILITÉ DE BASE :

Dans un premier temps, on cherche à caractériser la sensibilité à l'aide des 3 familles de faits.

On renseigne d'abord les premiers paramètres relatifs à la caractérisation de la sensibilité de base, les plages de valeurs de ces paramètres sont rappelées ci-dessous :

- ✓ Couple énergie actionneur = XY
- ✓ Humidité = [0, 1, 2, 3, 4, 5]
- ✓ Température = [0, 1, 2, 3, 4, 5]
- ✓ Niveau d'eau = [0, 1, 2, 3, 4, 5]
- ✓ Actions mécaniques = [0, 1, 2, 3, 4, 5]
- ✓ Proximité littoraux = [0, 1]
- ✓ Proximité cours/points d'eau = [0, 1]
- ✓ Protection - Humidité = [0, 1]
- ✓ Protection - Température = [0, 1]
- ✓ Protection - Niveau eau = [0, 1]
- ✓ Protection - Actions mécaniques = [0, 1]
- ✓ Mesures spécifiques = [0, 1]

Les paramètres Humidité, Température, Niveau d'eau et Actions mécaniques caractérisent la nature de l'aléa climatique.

On détermine les interactions climatiques à partir du premier paramètre, par lecture dans les tableaux à l'intersection de la ligne X et de la colonne Y:

VALEUR (Couple énergie/actionneur) = XY

VALEUR (IC-Humidité) = η_{XY}

VALEUR (IC-Température) = θ_{XY}

VALEUR (IC-Niveau d'eau) = ν_{XY}

VALEUR (IC-AM_A) = αA_{XY}

VALEUR (IC-AM_B) = αB_{XY}

VALEUR (IC-AM_C) = αC_{XY}

On va ensuite appliquer les règles suivantes à notre équipement, dont on connaît à présent certaines caractéristiques.

Les quatre premières règles signifient que lorsque l'intensité des différents facteurs climatiques devient importante (ici supérieure ou égale à 4), on considère qu'il y a exposition de l'équipement à des conséquences négatives liées à ces impacts. On prend alors une valeur de départ de sensibilité qui correspond à une caractérisation de la gravité de ces conséquences :

- **RS.1 :**

SI	VALEUR (Humidité) ≥ 4
ET	VALEUR (IC-Humidité) > 0
ALORS	VALEUR (Sensibilité-Humidité) = η_{XY}

- **RS.2 :**

SI	VALEUR (Température) ≥ 4
ET	VALEUR (Température) > 0
ALORS	VALEUR (Sensibilité-Température) = θ_{XY}

- **RS.3 :**

SI	VALEUR (Niveau d'eau) ≥ 4
ET	VALEUR (IC- Niveau d'eau) > 0
ALORS	VALEUR (Sensibilité- Niveau d'eau) = ν_{XY}

- **RS.4 :**

SI	VALEUR (Actions Mécaniques) ≥ 4
ET	VALEUR (IC-AM _A) > 0
ET	VALEUR (IC-AM _B) > 0
ET	VALEUR (IC-AM _C) > 0
ALORS	VALEUR (Sensibilité- AM _A) = αA_{XY}
	VALEUR (Sensibilité- AM _B) = αB_{XY}
	VALEUR (Sensibilité- AM _C) = αC_{XY}

Avec les deux règles suivantes, on voit que la proximité d'une étendue d'eau augmente la sensibilité à la hausse du niveau d'eau de l'équipement, car son exposition est plus importante.

- **RS.5 :**

SI	VALEUR (Proximité littoraux) = 1
ET	VALEUR (Sensibilité - Niveau d'eau) > 0
ALORS	VALEUR (Sensibilité - Niveau d'eau) \leftarrow 1

- **RS.6 :**

SI	VALEUR (Proximité Cours/Point d'eau) = 1
ET	VALEUR (Sensibilité - Niveau d'eau) > 0
ALORS	VALEUR (Sensibilité - Niveau d'eau) \leftarrow 1

En cas d'absence de protection spécifique à un facteur climatique (étanchéité, blindage, isolant, etc...), la sensibilité à ce facteur augmente, augmentation plus importante si l'équipement est déjà très sensible.

La mention « FC » désigne ici et s'applique à tous les facteurs climatiques : « Humidité », « Température », « Niveau eau », « AM_A », « AM_B » et « AM_C ».

- **RS.7 :**

SI	VALEUR (Protection / Isolation - FC) = 0
ET	VALEUR (Sensibilité - FC) \geq 3
ALORS	VALEUR (Sensibilité - FC) \leftarrow 2

- **RS.8 :**

SI	VALEUR (Protection / Isolation - FC) = 0
ET	VALEUR (Sensibilité - FC) \leq 2
ALORS	VALEUR (Sensibilité - FC) \leftarrow 1

- **RS.9 :**

SI	VALEUR (Mesures spécifiques) = 1
ET	VALEUR (Sensibilité - Tous) > 0
ALORS	VALEUR (Sensibilité - Tous) \leftarrow -1

AGGRAVATEURS DE SENSIBILITÉ :

On poursuit avec les aggravateurs en entrant ensuite les paramètres pour les modifications de la sensibilité.

- ✓ État = [1, 2, 3, 4, 5]
- ✓ Âge = [1, 2, 3, 4, 5]
- ✓ Emplacement = [1, 2, 3, 4]
- ✓ Entretien = [0, 1]
- ✓ Dépendance SE unique = [0, 1]
- ✓ Relief = [-1, 0, 1, 2]
- ✓ Durée évènement = [1, 2, 3]

Plus l'état d'un équipement se dégrade et plus sa sensibilité à tous les facteurs climatiques augmente, augmentation d'autant plus importante que l'état de l'équipement est avancé. C'est ce que l'on représente à l'aide des règles suivantes :

- **RAS.1 :**

SI	VALEUR (État) = 4
ALORS	VALEUR (Sensibilité - Humidité) ← 2
	VALEUR (Sensibilité - Température) ← 2
	VALEUR (Sensibilité - Niveau d'eau) ← 2
	VALEUR (Sensibilité - AM _A) ← 2
	VALEUR (Sensibilité - AM _B) ← 2
	VALEUR (Sensibilité - AM _C) ← 2

- **RAS.2 :**

SI	VALEUR (État) = 5
ALORS	VALEUR (Sensibilité - Humidité) ← 3
	VALEUR (Sensibilité - Température) ← 3
	VALEUR (Sensibilité - Niveau d'eau) ← 3
	VALEUR (Sensibilité - AM _A) ← 3
	VALEUR (Sensibilité - AM _B) ← 3
	VALEUR (Sensibilité - AM _C) ← 3

On peut appliquer la même logique lorsqu'on considère l'âge de l'équipement : plus ce dernier est âgé et plus il est exposé à des défaillances (donc plus il est sensible) :

- **RAS.3 :**

SI	VALEUR ($\hat{\text{Age}}$) = 4
ALORS	VALEUR (Sensibilité - Humidité) \leftarrow 2
	VALEUR (Sensibilité - Température) \leftarrow 2
	VALEUR (Sensibilité - Niveau d'eau) \leftarrow 2
	VALEUR (Sensibilité - AM_A) \leftarrow 2
	VALEUR (Sensibilité - AM_B) \leftarrow 2
	VALEUR (Sensibilité - AM_C) \leftarrow 2

- **RAS.4 :**

SI	VALEUR ($\hat{\text{Age}}$) = 5
ALORS	VALEUR (Sensibilité - Humidité) \leftarrow 3
	VALEUR (Sensibilité - Température) \leftarrow 3
	VALEUR (Sensibilité - Niveau d'eau) \leftarrow 3
	VALEUR (Sensibilité - AM_A) \leftarrow 3
	VALEUR (Sensibilité - AM_B) \leftarrow 3
	VALEUR (Sensibilité - AM_C) \leftarrow 3

L'absence de programme d'entretien rend l'équipement plus sujet aux défaillances :

- **RAS.5 :**

SI	VALEUR (Entretien) = 0
ALORS	VALEUR (Sensibilité - Toutes) \leftarrow 1

Si l'équipement dépend expressément pour son fonctionnement d'un unique système essentiel, il se trouve très exposé en cas de défaillance de celui-ci. Cela augmente alors sa sensibilité.

- **RAS.6 :**

SI	VALEUR (Dépendance SE unique) = 1
ALORS	VALEUR (Sensibilité - Toutes) \leftarrow 1

En cas d'importante augmentation du niveau d'eau, les équipements positionnés au niveau du sol dans des dépressions du relief seront plus exposés à une submersion, et donc à des défaillances.

- **RAS.7 :**

SI	VALEUR (Niveau d'eau) ≥ 4
ET	VALEUR (Emplacement) = 1
ET	VALEUR (Relief) = - 1
ALORS	VALEUR (Sensibilité - Niveau d'eau) $\leftarrow 2$

En cas de forts débits de matières (de forts courants ou des vents importants par exemple), les équipements aériens et positionnés sur des élévations du relief sont plus exposés, et donc plus sensibles.

- **RAS.8 :**

SI	VALEUR (AM_A) ≥ 4
ET	VALEUR (Emplacement) = 3
ET	VALEUR (Relief) = 1
OU	VALEUR (Relief) = 2
ALORS	VALEUR (Sensibilité - AM_A) $\leftarrow 2$

Plus les événements climatiques durent, et plus l'exposition de l'équipement à des conséquences négatives augmentent, on augmente donc aussi la sensibilité.

- **RAS.9 :**

SI	VALEUR (Durée événement) = 3
ALORS	VALEUR (Sensibilité - Toutes) $\leftarrow 1$

Si un équipement est sensible à la température, le fait qu'il soit enterré diminue son exposition à des défaillances dues à des variations de température.

- **RAS.10 :**

SI	VALEUR (Sensibilité - Température) > 0
ET	VALEUR (Emplacement) = 2
ALORS	VALEUR (Sensibilité- Température) $\leftarrow -1$

En cas de sensibilité aux actions mécaniques, de la même manière que pour la température, la position enterrée de l'équipement diminue cette sensibilité.

- **RAS.II :**

SI	VALEUR (Sensibilité- AM_A) > 0
OU	VALEUR (Sensibilité- AM_B) > 0
OU	VALEUR (Sensibilité- AM_C) > 0
ET	VALEUR (Emplacement) = 2
ALORS	VALEUR (Sensibilité- AM) \leftarrow - 1

CRITICITÉ DE BASE :

On caractérise ensuite la criticité, en renseignant d'abord les champs suivants :

- ✓ Note gestionnaire = [0, 1, 2, 3, 4, 5]
- ✓ Besoin MP = [0, 1]
- ✓ Provenance MP = [0, 1]
- ✓ Diminution MP = [0, 1]

On prend pour valeur de base de la criticité de l'équipement la note que son gestionnaire (ou le propriétaire du réseau auquel il appartient) lui donne.

- **RC.1 :** VALEUR (Criticité) \Leftarrow VALEUR (Note gestionnaire)

Si l'équipement nécessite une ou plusieurs matières premières pour fonctionner normalement et que ces matières premières sont affectées par l'aléa climatique (en termes de quantité ou de disponibilité par exemple), les conséquences négatives seront d'autant plus importantes pour l'équipement. Cette augmentation est plus importante lorsque certaines ou toutes ces matières premières proviennent de l'extérieur du territoire de la MRC.

- **RC.2 :**

SI	VALEUR (Diminution MP) = 1
ET	VALEUR (Besoin MP) = 1
ET	VALEUR (Provenance MP) = 0
ALORS	VALEUR (Criticité) \leftarrow 2

- **RC.3 :**

SI	VALEUR (Diminution MP) = 1
ET	VALEUR (Besoin MP) = 1
ET	VALEUR (Provenance MP) = 1
ALORS	VALEUR (Criticité) \leftarrow 3

AGGRAVATEURS DE CRITICITÉ :

On affine ensuite la notion de criticité avec les aggravateurs :

- ✓ Zone importance = [0, 1]
- ✓ Densité = [1, 2, 3, 4, 5]

Plus il y a d'équipements concentrés au même endroit que celui étudié, et plus les conséquences négatives seront importantes, que ce soit pour l'équipement lui-même ou pour l'ensemble des réseaux de la MRC.

- **RAC.1 :**

SI	VALEUR (Densité) = 4
ALORS	VALEUR (Criticité) \leftarrow 2

- **RAC.2 :**

SI	VALEUR (Densité) = 5
ALORS	VALEUR (Criticité) \leftarrow 3

Si l'équipement se trouve dans un secteur de grande importance stratégique pour la MRC, l'ampleur des conséquences négatives s'en retrouve augmentée.

- **RAC.3 :**

SI	VALEUR (Zone importance) = 1
ALORS	VALEUR (Criticité) \leftarrow 1

RÉCAPITULATIF ET CONCLUSION :

On a alors les valeurs finales

- VALEUR (Criticité) = C
- VALEUR (Sensibilité- Humidité) = S_H
- VALEUR (Sensibilité- Température) = S_T
- VALEUR (Sensibilité- Niveau d'eau) = S_{NE}
- VALEUR (Sensibilité- AM_A) = S_{AMA}
- VALEUR (Sensibilité- AM_B) = S_{AMB}
- VALEUR (Sensibilité- AM_C) = S_{AMC}

On en déduit enfin la vulnérabilité de notre équipement en sommant criticité et sensibilité :

- VALEUR (Vulnérabilité- Humidité) = $S_H + C$
- VALEUR (Vulnérabilité- Température) = $S_T + C$
- VALEUR (Vulnérabilité- Niveau d'eau) = $S_{NE} + C$
- VALEUR (Vulnérabilité- AM_A) = $S_{AMA} + C$
- VALEUR (Vulnérabilité- AM_B) = $S_{AMB} + C$
- VALEUR (Vulnérabilité- AM_C) = $S_{AMC} + C$

ANNEXE 6 – Analyse : Équipement E1

PARAMÈTRES

SENSIBILITÉ DE BASE		AGGRAVATEURS DE SENSIBILITÉ		CRITICITÉ DE BASE		AGGRAVATEURS DE CRITICITÉ	
Couple énergie actionneur	EE	État	3	Note gestionnaire	5	Densité	4
Protection - Humidité	1	Âge	2	Besoin MP	0	Zone d'importance	1
Protection - Température	0	Emplacement	1	Provenance MP	0		
Protection - NE	0	Entretien	1	Diminution MP	0		
Protection - AM	1	Dépendance SE unique	1				
Mesures spécifiques	1	Relief	0				
Proximité cours / points d'eau	1	Durée d'évènement	2				
Proximité littoraux	0						
Humidité	4						
Température	4						
Niveau d'eau	4						
Actions mécaniques	4						

DÉTERMINATION DE LA SENSIBILITÉ

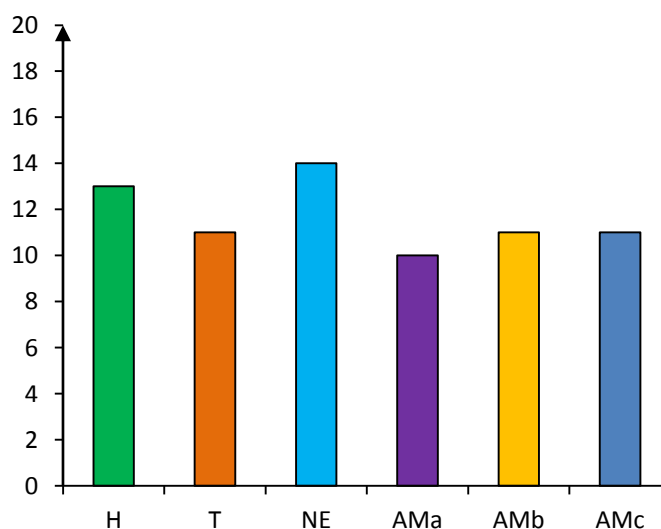
	RS									RAS										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
S_H	5	5	5	5	5	5	5	5	4	4	4	4	4	4	5	5	5	5	5	5
S_T	0	2	2	2	2	1	1	3	2	2	2	2	2	2	3	3	3	3	3	3
S_{NE}	0	0	3	3	3	4	6	6	5	5	5	5	5	5	6	6	6	6	6	6
S_{AMa}	0	0	0	2	2	2	2	2	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2
S_{AMb}	0	0	0	3	3	3	3	3	2	2	2	2	2	2	3	3	3	3	3	3
S_{AMc}	0	0	0	3	3	3	3	3	2	2	2	2	2	2	3	3	3	3	3	3

CRITICITÉ

	RC			RAC		
	1	2	3	1	2	3
C	5	5	5	7	7	8

VULNÉRABILITÉS FINALES

	TOTAL
V_H	13
V_T	11
V_{NE}	14
V_{AMa}	10
V_{AMb}	11
V_{AMc}	11



ANNEXE 7 – Analyse : Équipement E2

PARAMÈTRES

SENSIBILITÉ DE BASE		AGGRAVATEURS DE SENSIBILITÉ		CRITICITÉ DE BASE		AGGRAVATEURS DE CRITICITÉ	
Couple énergie actionneur	EE	État	3	Note gestionnaire	2	Densité	4
Protection - Humidité	1	Âge	2	Besoin MP	0	Zone d'importance	1
Protection - Température	0	Emplacement	1	Provenance MP	0		
Protection - NE	0	Entretien	1	Diminution MP	0		
Protection - AM	1	Dépendance SE unique	1				
Mesures spécifiques	1	Relief	0				
Proximité cours / points d'eau	1	Durée d'évènement	2				
Proximité littoraux	0						
Humidité	4						
Température	4						
Niveau d'eau	4						
Actions mécaniques	4						

DÉTERMINATION DE LA SENSIBILITÉ

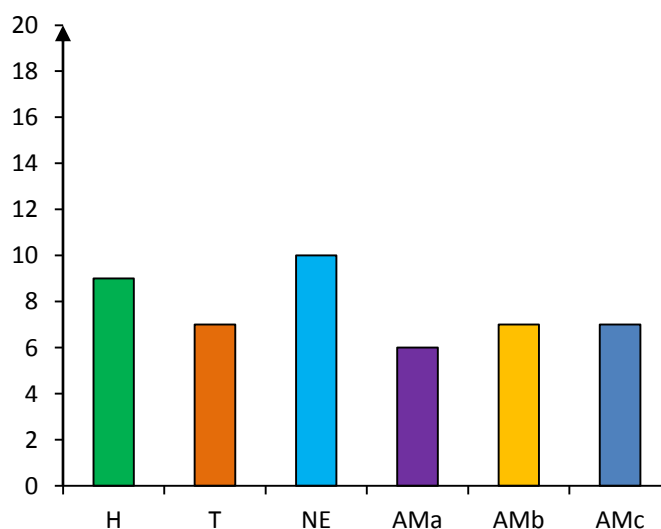
	RS									RAS										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
S_H	5	5	5	5	5	5	5	5	4	4	4	4	4	4	5	5	5	5	5	5
S_T	0	2	2	2	2	2	2	3	2	2	2	2	2	2	3	3	3	3	3	3
S_{NE}	0	0	3	3	3	4	6	6	5	5	5	5	5	5	6	6	6	6	6	6
S_{AMa}	0	0	0	2	2	2	2	2	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2
S_{AMb}	0	0	0	3	3	3	3	3	2	2	2	2	2	2	3	3	3	3	3	3
S_{AMc}	0	0	0	3	3	3	3	3	2	2	2	2	2	2	3	3	3	3	3	3

CRITICITÉ

	RC			RAC		
	1	2	3	1	2	3
C	2	2	2	3	3	4

VULNÉRABILITÉS FINALES

	TOTAL
V_H	9
V_T	7
V_{NE}	10
V_{AMa}	6
V_{AMb}	7
V_{AMc}	7



ANNEXE 8 – Analyse : Équipement E3

PARAMÈTRES

SENSIBILITÉ DE BASE		AGGRAVATEURS DE SENSIBILITÉ		CRITICITÉ DE BASE		AGGRAVATEURS DE CRITICITÉ	
Couple énergie actionneur	EE	État	4	Note gestionnaire	2	Densité	4
Protection - Humidité	1	Âge	4	Besoin MP	0	Zone d'importance	1
Protection - Température	0	Emplacement	1	Provenance MP	0		
Protection - NE	0	Entretien	1	Diminution MP	0		
Protection - AM	1	Dépendance SE unique	1				
Mesures spécifiques	1	Relief	0				
Proximité cours / points d'eau	1	Durée d'évènement	2				
Proximité littoraux	0						
Humidité	4						
Température	4						
Niveau d'eau	4						
Actions mécaniques	4						

DÉTERMINATION DE LA SENSIBILITÉ

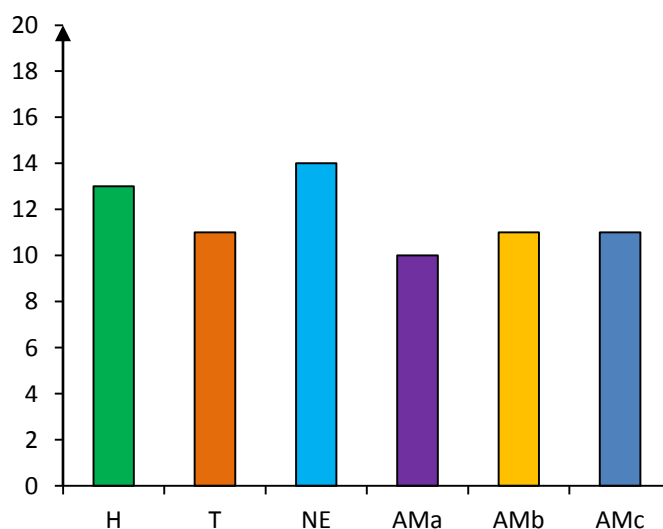
	RS									RAS										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
S_H	5	5	5	5	5	5	5	5	4	4	4	4	4	4	9	9	9	9	9	9
S_T	0	2	2	2	2	2	2	3	2	2	2	2	2	2	7	7	7	7	7	7
S_{NE}	0	0	3	3	3	4	6	6	5	5	5	5	5	5	10	10	10	10	10	10
S_{AMa}	0	0	0	2	2	2	2	2	1	1	1	1	1	1	6	6	6	6	6	6
S_{AMb}	0	0	0	3	3	3	3	3	2	2	2	2	2	2	7	7	7	7	7	7
S_{AMc}	0	0	0	3	3	3	3	3	2	2	2	2	2	2	7	7	7	7	7	7

CRITICITÉ

	RC			RAC		
	1	2	3	1	2	3
C	2	2	2	3	3	5

VULNÉRABILITÉS FINALES

	TOTAL
V_H	13
V_T	11
V_{NE}	14
V_{AMa}	10
V_{AMb}	11
V_{AMc}	11



ANNEXE 9 – Analyse : Équipement E4

PARAMÈTRES

SENSIBILITÉ DE BASE		AGGRAVATEURS DE SENSIBILITÉ		CRITICITÉ DE BASE		AGGRAVATEURS DE CRITICITÉ	
Couple énergie actionneur	EE	État	5	Note gestionnaire	3	Densité	1
Protection - Humidité	1	Âge	5	Besoin MP	0	Zone d'importance	0
Protection - Température	0	Emplacement	1	Provenance MP	0		
Protection - NE	0	Entretien	0	Diminution MP	0		
Protection - AM	1	Dépendance SE unique	1				
Mesures spécifiques	1	Relief	-1				
Proximité cours / points d'eau	1	Durée d'évènement	2				
Proximité littoraux	0						
Humidité	4						
Température	4						
Niveau d'eau	4						
Actions mécaniques	4						

DÉTERMINATION DE LA SENSIBILITÉ

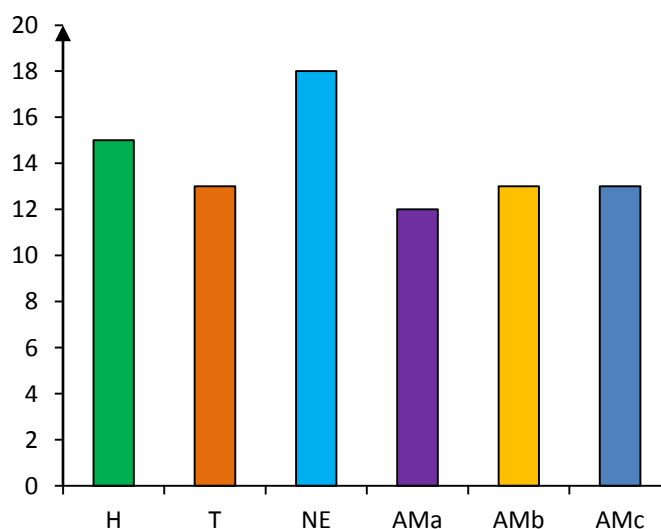
	RS									RAS										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
S_H	5	5	5	5	5	5	5	5	4	4	7	7	10	11	12	12	12	12	12	12
S_T	0	2	2	2	2	2	2	3	2	2	5	5	8	9	10	10	10	10	10	10
S_{NE}	0	0	3	3	3	4	6	6	5	5	8	8	11	12	13	15	15	15	15	15
S_{AMa}	0	0	0	2	2	2	2	2	1	1	4	4	7	8	9	9	9	9	9	9
S_{AMb}	0	0	0	3	3	3	3	3	2	2	5	5	8	9	10	10	10	10	10	10
S_{AMc}	0	0	0	3	3	3	3	3	2	2	5	5	8	9	10	10	10	10	10	10

CRITICITÉ

	RC			RAC		
	1	2	3	1	2	3
C	3	3	3	3	3	3

VULNÉRABILITÉS FINALES

	TOTAL
V_H	15
V_T	13
V_{NE}	18
V_{AMa}	12
V_{AMb}	13
V_{AMc}	13



ANNEXE 10 – Analyse : Équipement E5

PARAMÈTRES

SENSIBILITÉ DE BASE		AGGRAVATEURS DE SENSIBILITÉ		CRITICITÉ DE BASE		AGGRAVATEURS DE CRITICITÉ	
Couple énergie actionneur	EE	État	3	Note gestionnaire	3	Densité	2
Protection - Humidité	1	Âge	3	Besoin MP	0	Zone d'importance	1
Protection - Température	0	Emplacement	1	Provenance MP	0		
Protection - NE	0	Entretien	1	Diminution MP	0		
Protection - AM	1	Dépendance SE unique	1				
Mesures spécifiques	1	Relief	2				
Proximité cours / points d'eau	1	Durée d'évènement	2				
Proximité littoraux	0						
Humidité	4						
Température	4						
Niveau d'eau	4						
Actions mécaniques	4						

DÉTERMINATION DE LA SENSIBILITÉ

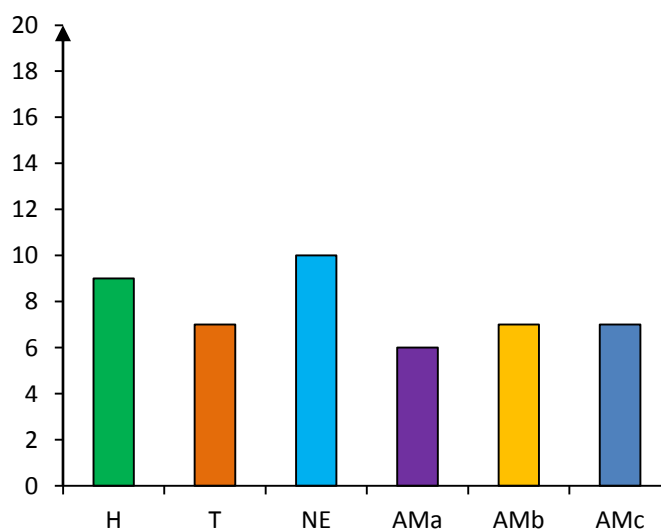
	RS									RAS										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
S_H	5	5	5	5	5	5	5	5	4	4	4	4	4	4	5	5	5	5	5	5
S_T	0	2	2	2	2	2	2	3	2	2	2	2	2	2	3	3	3	3	3	3
S_{NE}	0	0	3	3	3	4	6	6	5	5	5	5	5	5	6	6	6	6	6	6
S_{AMa}	0	0	0	2	2	2	2	2	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2
S_{AMb}	0	0	0	3	3	3	3	3	2	2	2	2	2	2	3	3	3	3	3	3
S_{AMc}	0	0	0	3	3	3	3	3	2	2	2	2	2	2	3	3	3	3	3	3

CRITICITÉ

	RC			RAC		
	1	2	3	1	2	3
C	3	3	3	3	3	4

VULNÉRABILITÉS FINALES

	TOTAL
V_H	9
V_T	7
V_{NE}	10
V_{AMa}	6
V_{AMb}	7
V_{AMc}	7



ANNEXE 11 – Analyse : Équipement E6

PARAMÈTRES

SENSIBILITÉ DE BASE		AGGRAVATEURS DE SENSIBILITÉ		CRITICITÉ DE BASE		AGGRAVATEURS DE CRITICITÉ	
Couple énergie actionneur	EE	État	3	Note gestionnaire	3	Densité	1
Protection - Humidité	1	Âge	3	Besoin MP	0	Zone d'importance	0
Protection - Température	0	Emplacement	1	Provenance MP	0		
Protection - NE	0	Entretien	0	Diminution MP	0		
Protection - AM	1	Dépendance SE unique	1				
Mesures spécifiques	1	Relief	0				
Proximité cours / points d'eau	0	Durée d'évènement	2				
Proximité littoraux	0						
Humidité	4						
Température	4						
Niveau d'eau	4						
Actions mécaniques	4						

DÉTERMINATION DE LA SENSIBILITÉ

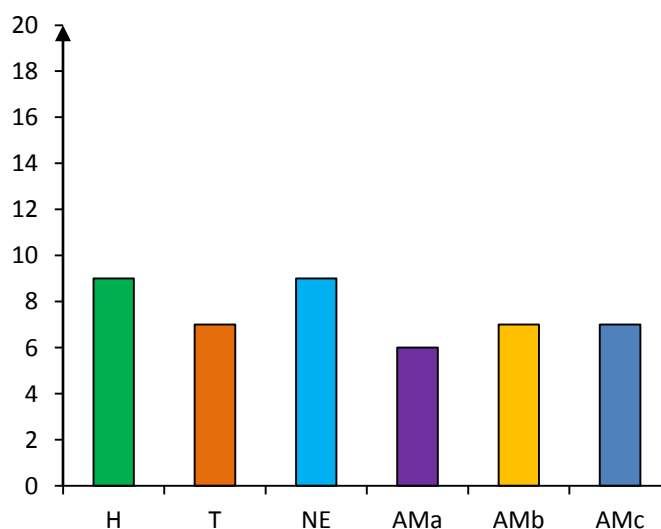
	RS									RAS										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
S_H	5	5	5	5	5	5	5	5	4	4	4	4	4	5	6	6	6	6	6	6
S_T	0	2	2	2	2	2	2	3	2	2	2	2	2	3	4	4	4	4	4	4
S_{NE}	0	0	3	3	3	3	5	5	4	4	4	4	4	5	6	6	6	6	6	6
S_{AMa}	0	0	0	2	2	2	2	2	1	1	1	1	1	2	3	3	3	3	3	3
S_{AMb}	0	0	0	3	3	3	3	3	2	2	2	2	2	3	4	4	4	4	4	4
S_{AMc}	0	0	0	3	3	3	3	3	2	2	2	2	2	3	4	4	4	4	4	4

CRITICITÉ

	RC			RAC		
	1	2	3	1	2	3
C	3	3	3	3	3	3

VULNÉRABILITÉS FINALES

	TOTAL
V_H	9
V_T	7
V_{NE}	9
V_{AMa}	6
V_{AMb}	7
V_{AMc}	7



ANNEXE 12 – Analyse : Équipement G1

PARAMÈTRES

SENSIBILITÉ DE BASE		AGGRAVATEURS DE SENSIBILITÉ		CRITICITÉ DE BASE		AGGRAVATEURS DE CRITICITÉ	
Couple énergie actionneur	MM	État	3	Note gestionnaire	5	Densité	4
Protection - Humidité	0	Âge	3	Besoin MP	0	Zone d'importance	1
Protection - Température	1	Emplacement	2	Provenance MP	0		
Protection - NE	0	Entretien	1	Diminution MP	0		
Protection - AM	1	Dépendance SE unique	1				
Mesures spécifiques	1	Relief	0				
Proximité cours / points d'eau	1	Durée d'évènement	2				
Proximité littoraux	0						
Humidité	4						
Température	4						
Niveau d'eau	4						
Actions mécaniques	4						

DÉTERMINATION DE LA SENSIBILITÉ

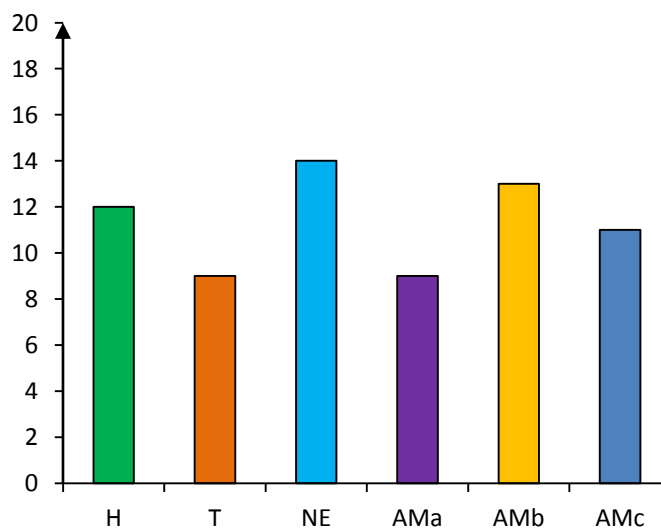
	RS									RAS										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
S_H	2	2	2	2	2	2	2	3	2	2	2	2	2	2	3	3	3	3	3	3
S_T	0	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0
S_{NE}	0	0	2	2	2	3	5	5	4	4	4	4	4	4	5	5	5	5	5	5
S_{AMa}	0	0	0	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	0
S_{AMb}	0	0	0	5	5	5	5	5	4	4	4	4	4	4	5	5	5	5	5	4
S_{AMc}	0	0	0	3	3	3	3	3	2	2	2	2	2	2	3	3	3	3	3	2

CRITICITÉ

	RC			RAC		
	1	2	3	1	2	3
C	5	5	5	7	7	9

VULNÉRABILITÉS FINALES

	TOTAL
V_H	12
V_T	9
V_{NE}	14
V_{AMa}	9
V_{AMb}	13
V_{AMc}	11



ANNEXE 13 – Analyse : Équipement G2

PARAMÈTRES

SENSIBILITÉ DE BASE		AGGRAVATEURS DE SENSIBILITÉ		CRITICITÉ DE BASE		AGGRAVATEURS DE CRITICITÉ	
Couple énergie actionneur	MM	État	4	Note gestionnaire	3	Densité	2
Protection - Humidité	0	Âge	3	Besoin MP	0	Zone d'importance	0
Protection - Température	1	Emplacement	2	Provenance MP	0		
Protection - NE	0	Entretien	1	Diminution MP	0		
Protection - AM	1	Dépendance SE unique	1				
Mesures spécifiques	1	Relief	0				
Proximité cours / points d'eau	0	Durée d'évènement	2				
Proximité littoraux	0						
Humidité	4						
Température	4						
Niveau d'eau	4						
Actions mécaniques	4						

DÉTERMINATION DE LA SENSIBILITÉ

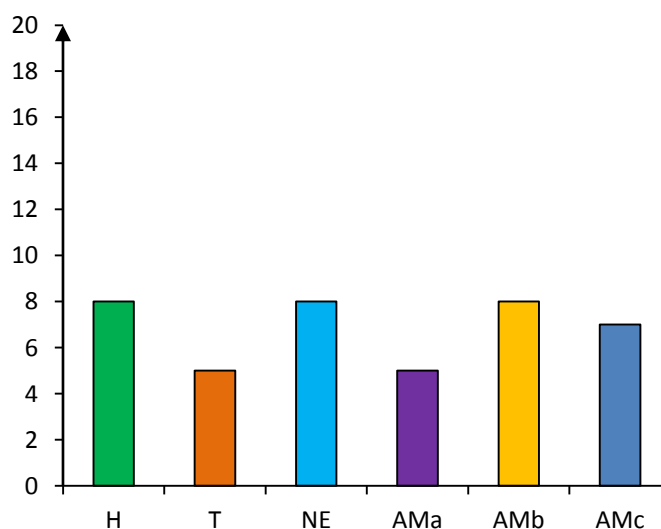
	RS									RAS										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
S_H	2	2	2	2	2	2	2	3	2	4	4	4	4	4	5	5	5	5	5	5
S_T	0	1	1	1	1	1	1	1	0	2	2	2	2	2	3	3	3	3	2	2
S_{NE}	0	0	2	2	2	2	2	3	2	4	4	4	4	4	5	5	5	5	5	5
S_{AMa}	0	0	0	1	1	1	1	1	0	2	2	2	2	2	3	3	3	3	3	2
S_{AMb}	0	0	0	5	5	5	5	5	4	6	6	6	6	6	7	7	7	7	7	5
S_{AMc}	0	0	0	3	3	3	3	3	2	4	4	4	4	4	5	5	5	5	5	4

CRITICITÉ

	RC			RAC		
	1	2	3	1	2	3
C	3	3	3	3	3	3

VULNÉRABILITÉS FINALES

	TOTAL
V_H	8
V_T	5
V_{NE}	8
V_{AMa}	5
V_{AMb}	8
V_{AMc}	7



ANNEXE 14 – Analyse : Équipement G3

PARAMÈTRES

SENSIBILITÉ DE BASE		AGGRAVATEURS DE SENSIBILITÉ		CRITICITÉ DE BASE		AGGRAVATEURS DE CRITICITÉ	
Couple énergie actionneur	MM	État	5	Note gestionnaire	3	Densité	1
Protection - Humidité	0	Âge	4	Besoin MP	0	Zone d'importance	0
Protection - Température	1	Emplacement	2	Provenance MP	0		
Protection - NE	0	Entretien	0	Diminution MP	0		
Protection - AM	1	Dépendance SE unique	1				
Mesures spécifiques	1	Relief	0				
Proximité cours / points d'eau	1	Durée d'évènement	2				
Proximité littoraux	0						
Humidité	4						
Température	4						
Niveau d'eau	4						
Actions mécaniques	4						

DÉTERMINATION DE LA SENSIBILITÉ

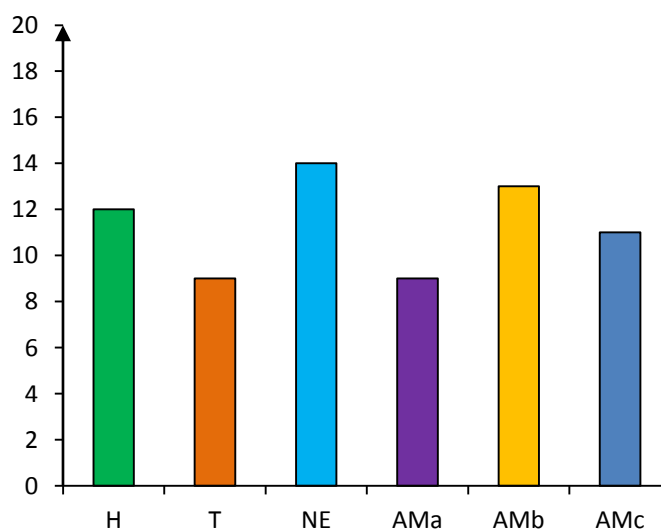
	RS									RAS										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
S_H	2	2	2	2	2	2	2	3	2	2	5	7	7	8	9	9	9	9	9	9
S_T	0	1	1	1	1	1	1	1	0	0	3	5	5	6	7	7	7	7	6	6
S_{NE}	0	0	2	2	2	3	5	5	4	4	7	9	9	10	11	11	11	11	11	11
S_{AMa}	0	0	0	1	1	1	1	1	0	0	3	5	5	6	7	7	7	7	7	6
S_{AMb}	0	0	0	5	5	5	5	5	4	4	7	9	9	10	11	11	11	11	11	10
S_{AMc}	0	0	0	3	3	3	3	3	2	2	5	7	7	8	9	9	9	9	9	8

CRITICITÉ

	RC			RAC		
	1	2	3	1	2	3
C	3	3	3	3	3	3

VULNÉRABILITÉS FINALES

	TOTAL
V_H	12
V_T	9
V_{NE}	14
V_{AMa}	9
V_{AMb}	13
V_{AMc}	11



ANNEXE 15 – Analyse : Équipement G4

PARAMÈTRES

SENSIBILITÉ DE BASE		AGGRAVATEURS DE SENSIBILITÉ		CRITICITÉ DE BASE		AGGRAVATEURS DE CRITICITÉ	
Couple énergie actionneur	MM	État	3	Note gestionnaire	3	Densité	1
Protection - Humidité	0	Âge	3	Besoin MP	0	Zone d'importance	0
Protection - Température	1	Emplacement	2	Provenance MP	0		
Protection - NE	0	Entretien	1	Diminution MP	0		
Protection - AM	1	Dépendance SE unique	1				
Mesures spécifiques	1	Relief	0				
Proximité cours / points d'eau	1	Durée d'évènement	2				
Proximité littoraux	0						
Humidité	4						
Température	4						
Niveau d'eau	4						
Actions mécaniques	4						

DÉTERMINATION DE LA SENSIBILITÉ

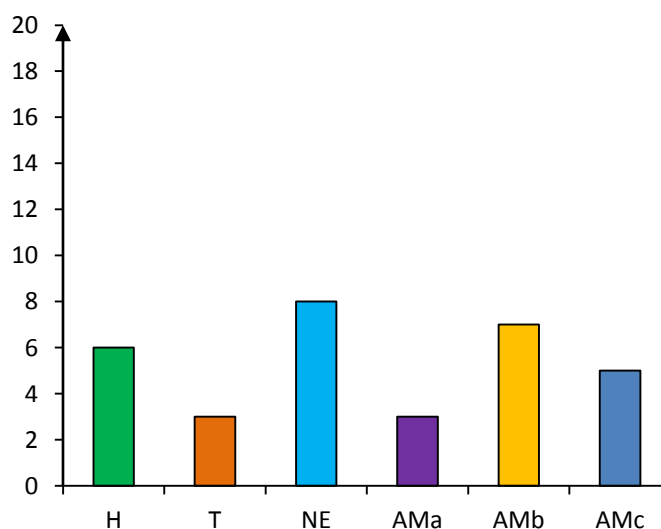
	RS									RAS										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
S_H	2	2	2	2	2	2	2	3	2	2	2	2	2	2	3	3	3	3	3	3
S_T	0	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0
S_{NE}	0	0	2	2	2	3	5	5	4	4	4	4	4	4	5	5	5	5	5	5
S_{AMa}	0	0	0	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	0
S_{AMb}	0	0	0	5	5	5	5	5	4	4	4	4	4	4	5	5	5	5	5	4
S_{AMc}	0	0	0	3	3	3	3	3	2	2	2	2	2	2	3	3	3	3	3	2

CRITICITÉ

	RC			RAC		
	1	2	3	1	2	3
C	3	3	3	3	3	3

VULNÉRABILITÉS FINALES

	TOTAL
V_H	5
V_T	3
V_{NE}	8
V_{AMa}	3
V_{AMb}	7
V_{AMc}	5



ANNEXE 16 – Analyse : Équipement G5

PARAMÈTRES

SENSIBILITÉ DE BASE		AGGRAVATEURS DE SENSIBILITÉ		CRITICITÉ DE BASE		AGGRAVATEURS DE CRITICITÉ	
Couple énergie actionneur	MM	État	4	Note gestionnaire	4	Densité	2
Protection - Humidité	1	Âge	3	Besoin MP	0	Zone d'importance	1
Protection - Température	1	Emplacement	2	Provenance MP	0		
Protection - NE	0	Entretien	1	Diminution MP	0		
Protection - AM	0	Dépendance SE unique	1				
Mesures spécifiques	1	Relief	0				
Proximité cours / points d'eau	1	Durée d'évènement	2				
Proximité littoraux	0						
Humidité	4						
Température	4						
Niveau d'eau	4						
Actions mécaniques	4						

DÉTERMINATION DE LA SENSIBILITÉ

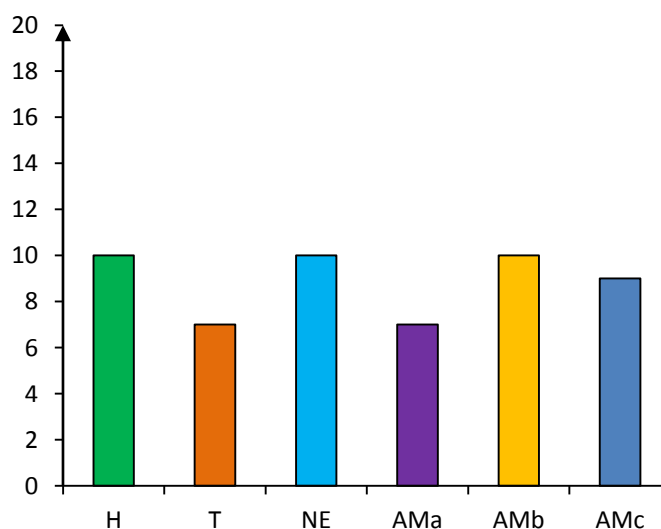
	RS									RAS										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
S_H	2	2	2	2	2	2	2	3	2	4	4	4	4	4	5	5	5	5	5	5
S_T	0	1	1	1	1	1	1	1	0	2	2	2	2	2	3	3	3	3	2	2
S_{NE}	0	0	2	2	2	2	2	3	2	4	4	4	4	4	5	5	5	5	5	5
S_{AMa}	0	0	0	1	1	1	1	1	0	2	2	2	2	2	3	3	3	3	3	2
S_{AMb}	0	0	0	5	5	5	5	5	4	6	6	6	6	6	7	7	7	7	7	5
S_{AMc}	0	0	0	3	3	3	3	3	2	4	4	4	4	4	5	5	5	5	5	4

CRITICITÉ

	RC			RAC		
	1	2	3	1	2	3
C	4	4	4	4	4	5

VULNÉRABILITÉS FINALES

	TOTAL
V_H	10
V_T	7
V_{NE}	10
V_{AMa}	7
V_{AMb}	10
V_{AMc}	9



ANNEXE 17 – Analyse : Équipement T1

PARAMÈTRES

SENSIBILITÉ DE BASE		AGGRAVATEURS DE SENSIBILITÉ		CRITICITÉ DE BASE		AGGRAVATEURS DE CRITICITÉ	
Couple énergie actionneur	EE	État	3	Note gestionnaire	5	Densité	1
Protection - Humidité	1	Âge	3	Besoin MP	0	Zone d'importance	0
Protection - Température	1	Emplacement	3	Provenance MP	0		
Protection - NE	0	Entretien	1	Diminution MP	0		
Protection - AM	0	Dépendance SE unique	0				
Mesures spécifiques	0	Relief	2				
Proximité cours / points d'eau	0	Durée d'évènement	2				
Proximité littoraux	0						
Humidité	4						
Température	4						
Niveau d'eau	4						
Actions mécaniques	4						

DÉTERMINATION DE LA SENSIBILITÉ

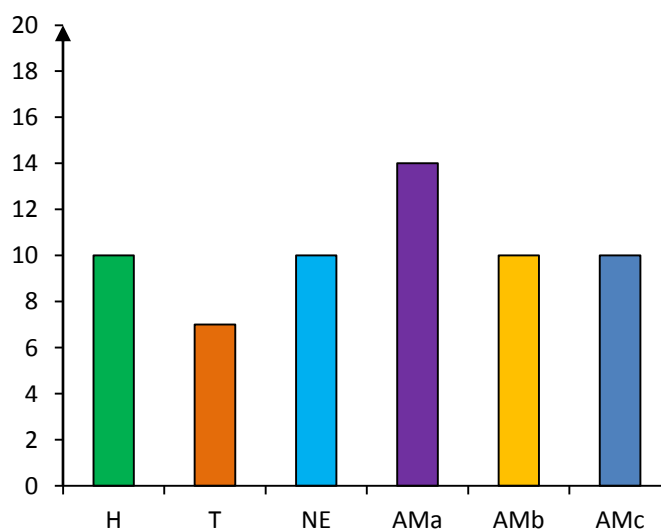
	RS									RAS										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
S_H	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
S_T	0	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
S_{NE}	0	0	3	3	3	3	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
S_{AMa}	0	0	0	5	5	5	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	9	9	9	9
S_{AMb}	0	0	0	3	3	3	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
S_{AMc}	0	0	0	3	3	3	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5

CRITICITÉ

	RC			RAC		
	1	2	3	1	2	3
C	5	5	5	5	5	5

VULNÉRABILITÉS FINALES

	TOTAL
V_H	10
V_T	7
V_{NE}	10
V_{AMa}	14
V_{AMb}	10
V_{AMc}	10



ANNEXE 18 – Analyse : Équipement T2

PARAMÈTRES

SENSIBILITÉ DE BASE		AGGRAVATEURS DE SENSIBILITÉ		CRITICITÉ DE BASE		AGGRAVATEURS DE CRITICITÉ	
Couple énergie actionneur	EE	État	2	Note gestionnaire	5	Densité	4
Protection - Humidité	1	Âge	4	Besoin MP	0	Zone d'importance	1
Protection - Température	1	Emplacement	3	Provenance MP	0		
Protection - NE	0	Entretien	1	Diminution MP	0		
Protection - AM	0	Dépendance SE unique	0				
Mesures spécifiques	0	Relief	1				
Proximité cours / points d'eau	0	Durée d'évènement	2				
Proximité littoraux	0						
Humidité	4						
Température	4						
Niveau d'eau	4						
Actions mécaniques	4						

DÉTERMINATION DE LA SENSIBILITÉ

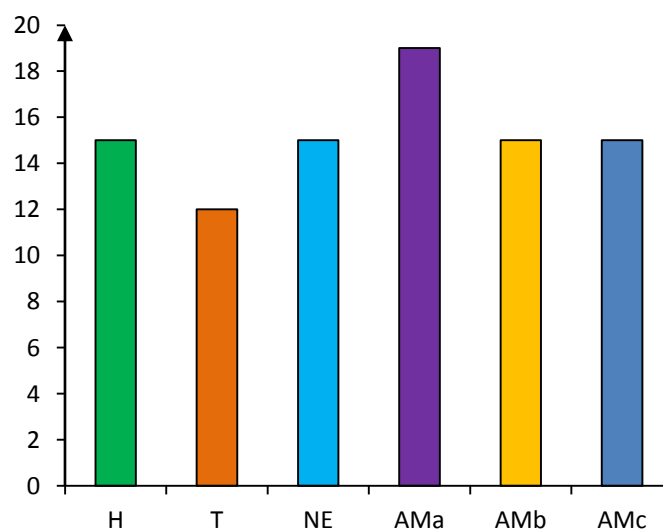
	RS									RAS										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
S_H	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	7	7	7	7	7	7	7	7	7
S_T	0	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	4	4	4	4	4	4	4	4	4
S_{NE}	0	0	3	3	3	3	5	5	5	5	5	7	7	7	7	7	7	7	7	7
S_{AMa}	0	0	0	5	5	5	7	7	7	7	7	9	9	9	9	9	11	11	11	11
S_{AMb}	0	0	0	3	3	3	5	5	5	5	5	7	7	7	7	7	7	7	7	7
S_{AMc}	0	0	0	3	3	3	5	5	5	5	5	7	7	7	7	7	7	7	7	7

CRITICITÉ

	RC			RAC		
	1	2	3	1	2	3
C	5	5	5	7	7	8

VULNÉRABILITÉS FINALES

	TOTAL
V_H	15
V_T	12
V_{NE}	15
V_{AMa}	19
V_{AMb}	15
V_{AMc}	15



ANNEXE 19 – Analyse : Équipement T3

PARAMÈTRES

SENSIBILITÉ DE BASE		AGGRAVATEURS DE SENSIBILITÉ		CRITICITÉ DE BASE		AGGRAVATEURS DE CRITICITÉ	
Couple énergie actionneur	EE	État	3	Note gestionnaire	3	Densité	1
Protection - Humidité	1	Âge	3	Besoin MP	0	Zone d'importance	0
Protection - Température	1	Emplacement	3	Provenance MP	0		
Protection - NE	0	Entretien	1	Diminution MP	0		
Protection - AM	0	Dépendance SE unique	0				
Mesures spécifiques	0	Relief	0				
Proximité cours / points d'eau	0	Durée d'évènement	2				
Proximité littoraux	0						
Humidité	4						
Température	4						
Niveau d'eau	4						
Actions mécaniques	4						

DÉTERMINATION DE LA SENSIBILITÉ

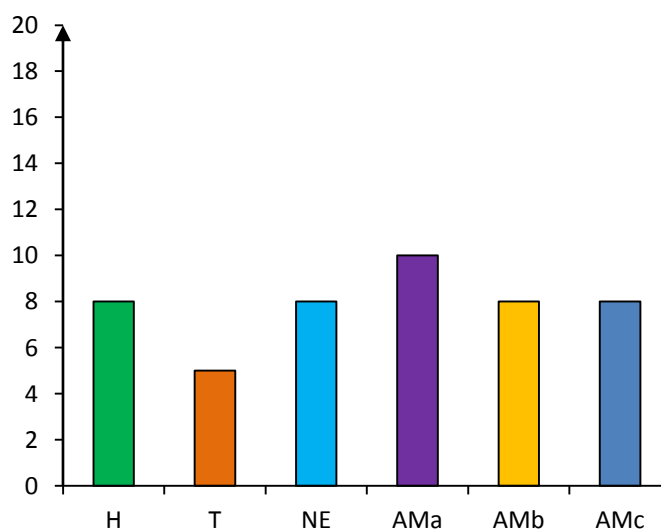
	RS									RAS										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
S_H	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	7	7	7	7	7	7	7	7	7
S_T	0	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	4	4	4	4	4	4	4	4	4
S_{NE}	0	0	3	3	3	3	5	5	5	5	5	7	7	7	7	7	7	7	7	7
S_{AMa}	0	0	0	5	5	5	7	7	7	7	7	9	9	9	9	9	11	11	11	11
S_{AMb}	0	0	0	3	3	3	5	5	5	5	5	7	7	7	7	7	7	7	7	7
S_{AMc}	0	0	0	3	3	3	5	5	5	5	5	7	7	7	7	7	7	7	7	7

CRITICITÉ

	RC			RAC		
	1	2	3	1	2	3
C	3	3	3	3	3	3

VULNÉRABILITÉS FINALES

	TOTAL
V_H	8
V_T	5
V_{NE}	8
V_{AMa}	10
V_{AMb}	8
V_{AMc}	8



ANNEXE 20 – Analyse : Équipement T4

PARAMÈTRES

SENSIBILITÉ DE BASE		AGGRAVATEURS DE SENSIBILITÉ		CRITICITÉ DE BASE		AGGRAVATEURS DE CRITICITÉ	
Couple énergie actionneur	EE	État	5	Note gestionnaire	3	Densité	1
Protection - Humidité	1	Âge	4	Besoin MP	0	Zone d'importance	0
Protection - Température	1	Emplacement	3	Provenance MP	0		
Protection - NE	0	Entretien	0	Diminution MP	0		
Protection - AM	0	Dépendance SE unique	0				
Mesures spécifiques	0	Relief	0				
Proximité cours / points d'eau	1	Durée d'évènement	2				
Proximité littoraux	0						
Humidité	4						
Température	4						
Niveau d'eau	4						
Actions mécaniques	4						

DÉTERMINATION DE LA SENSIBILITÉ

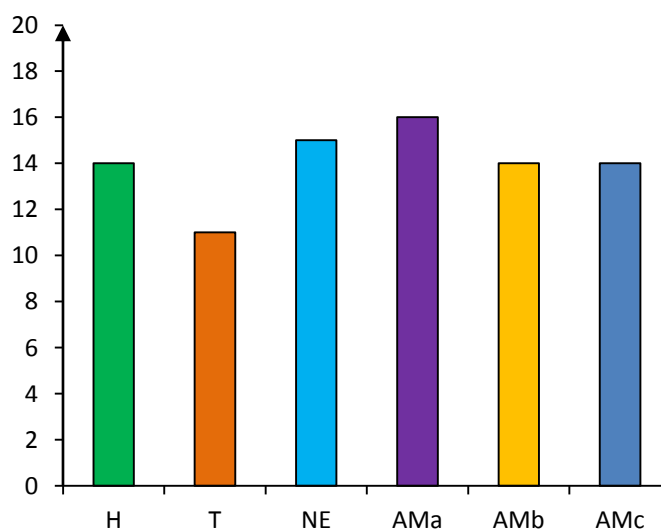
	RS									RAS										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
S_H	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	8	10	10	11	11	11	11	11	11	11
S_T	0	2	2	2	2	2	2	2	2	2	5	7	7	8	8	8	8	8	8	8
S_{NE}	0	0	3	3	3	4	6	6	6	6	9	11	11	12	12	12	12	12	12	12
S_{AMa}	0	0	0	5	5	5	7	7	7	7	10	12	12	13	13	13	13	13	13	13
S_{AMb}	0	0	0	3	3	3	5	5	5	5	8	10	10	11	11	11	11	11	11	11
S_{AMc}	0	0	0	3	3	3	5	5	5	5	8	10	10	11	11	11	11	11	11	11

CRITICITÉ

	RC			RAC		
	1	2	3	1	2	3
C	3	3	3	3	3	3

VULNÉRABILITÉS FINALES

	TOTAL
V_H	14
V_T	11
V_{NE}	15
V_{AMa}	16
V_{AMb}	14
V_{AMc}	14



ANNEXE 21 – Analyse : Équipement H1

PARAMÈTRES

SENSIBILITÉ DE BASE		AGGRAVATEURS DE SENSIBILITÉ		CRITICITÉ DE BASE		AGGRAVATEURS DE CRITICITÉ	
Couple énergie actionneur	MH	État	3	Note gestionnaire	5	Densité	4
Protection - Humidité	0	Âge	4	Besoin MP	1	Zone d'importance	1
Protection - Température	0	Emplacement	1	Provenance MP	0		
Protection - NE	0	Entretien	1	Diminution MP	1		
Protection - AM	1	Dépendance SE unique	0				
Mesures spécifiques	1	Relief	0				
Proximité cours / points d'eau	1	Durée d'évènement	2				
Proximité littoraux	0						
Humidité	4						
Température	4						
Niveau d'eau	4						
Actions mécaniques	4						

DÉTERMINATION DE LA SENSIBILITÉ

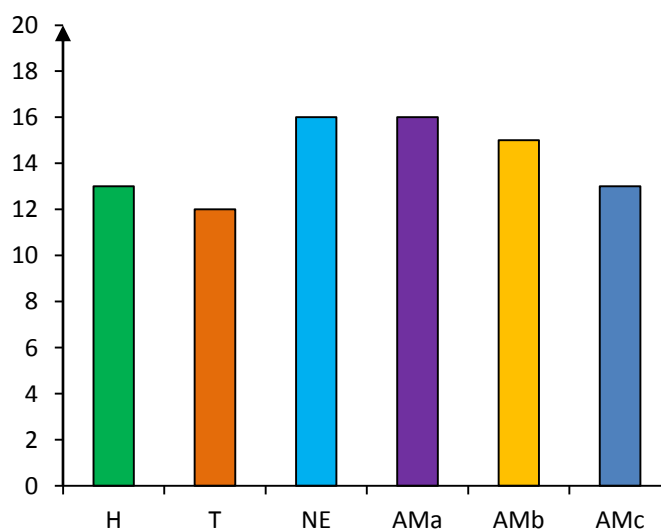
	RS									RAS										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
S_H	1	1	1	1	1	1	1	2	1	1	1	3	3	3	3	3	3	3	3	3
S_T	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	2	2	2	2	2	2	2	2	2
S_{NE}	0	0	2	2	2	3	5	5	4	4	4	6	6	6	6	6	6	6	6	6
S_{AMa}	0	0	0	5	5	5	5	5	4	4	4	6	6	6	6	6	6	6	6	6
S_{AMb}	0	0	0	4	4	4	4	4	3	3	3	5	5	5	5	5	5	5	5	5
S_{AMc}	0	0	0	2	2	2	2	2	1	1	1	3	3	3	3	3	3	3	3	3

CRITICITÉ

	RC			RAC		
	1	2	3	1	2	3
C	5	7	7	9	9	10

VULNÉRABILITÉS FINALES

	TOTAL
V_H	13
V_T	12
V_{NE}	16
V_{AMa}	16
V_{AMb}	15
V_{AMc}	13



ANNEXE 22 – Analyse : Équipement H2

PARAMÈTRES

SENSIBILITÉ DE BASE		AGGRAVATEURS DE SENSIBILITÉ		CRITICITÉ DE BASE		AGGRAVATEURS DE CRITICITÉ	
Couple énergie actionneur	MH	État	4	Note gestionnaire	3	Densité	1
Protection - Humidité	0	Âge	5	Besoin MP	1	Zone d'importance	0
Protection - Température	0	Emplacement	1	Provenance MP	0		
Protection - NE	0	Entretien	1	Diminution MP	1		
Protection - AM	1	Dépendance SE unique	0				
Mesures spécifiques	1	Relief	-1				
Proximité cours / points d'eau	1	Durée d'évènement	2				
Proximité littoraux	0						
Humidité	4						
Température	4						
Niveau d'eau	4						
Actions mécaniques	4						

DÉTERMINATION DE LA SENSIBILITÉ

	RS									RAS										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
S_H	1	1	1	1	1	1	1	2	1	3	3	3	6	6	6	6	6	6	6	6
S_T	0	0	0	0	0	0	0	1	0	2	2	2	5	5	5	5	5	5	5	5
S_{NE}	0	0	2	2	2	3	5	5	4	6	6	6	9	9	9	11	11	11	11	11
S_{AMa}	0	0	0	5	5	5	5	5	4	6	6	6	9	9	9	9	9	9	9	9
S_{AMb}	0	0	0	4	4	4	4	4	3	5	5	5	8	8	8	8	8	8	8	8
S_{AMc}	0	0	0	2	2	2	2	2	1	3	3	3	6	6	6	6	6	6	6	6

CRITICITÉ

	RC			RAC		
	1	2	3	1	2	3
C	3	5	5	5	5	5

VULNÉRABILITÉS FINALES

	TOTAL
V_H	11
V_T	10
V_{NE}	16
V_{AMa}	14
V_{AMb}	13
V_{AMc}	11

